

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

katedra fyzické geografie a geoekologie



**HODNOCENÍ EROZNÍCH PROCESŮ S VYUŽITÍM MODELŮ
WATEM/ SEDEM A USPED**

**THE ASSESSEMENT OF SOIL EROSION PROCESSES BY USING WATEM/
SEDEM AND USPED MODELS**

Diplomová práce

Barbora Vysloužilová

Praha 2010

Vedoucí práce: RNDr. Zdeněk Kliment, CSc.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně, a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla použita k získání stejného nebo jiného akademického titulu

V Praze, 26. dubna 2010

Barbora Vysloužilová

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému školiteli RNDr. Zdeňkovi Klimentovi, CSc. za vedení práce, cenné rady a čas, který mi věnoval při konzultacích. Zároveň děkuji Ing. Zbyňkovi Kulhavému, CSc. a jeho kolegům z VÚMOP, v. v. i., za poskytnutí datových zdrojů a četných informací k zájmovému povodí. Ing. Luděkovi Strouhalovi z Katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství ČVUT a Mgr. Stanislavu Bekovi z Přírodovědecké fakulty UK patří poděkování za poskytnutí cenných rad při zpracování erozních modelů v prostředí GIS. V neposlední řadě děkuji pracovníkům Centrálního předpovědního pracoviště ČHMÚ za poskytnuté rady a materiály.

ABSTRAKT

Vodní eroze patří v České republice k nejzávažnějším faktorům, které poškozují zemědělské půdy. V minulosti bylo vyvinuto mnoho metod hodnocení erozního ohrožení pomocí matematických modelů. Nejpoužívanějším je univerzální rovnice ztráty půdy USLE., která sloužila však ke kalibraci a jako báze pro vznik modelů WaTEM/ SEDEM (Van Rompaey a kol. 2001, Van Oost a kol. 2000, Verstraeten a kol. 2002) a USPED (Mitášová a kol., 1996), které jsou v této práci aplikovány na experimentálním povodí Černíči. Model WaTEM/ SEDEM je schopen vypočítat i odnos plavenin závěrovým profilem. Během mimořádných srážko-odtokových událostí dochází ke zvýšení intenzity erozních procesů. Práce se také zabývá jejich příčinami, četností a průběhem, jak z hlediska průběhu odtokové vlny, tak i z pohledu transportu plavenin a látek v povodí. Zároveň je vyhodnocena kvalita povrchových vod.

KLÍČOVÁ SLOVA: eroze, mimořádná srážko-odtoková událost USPED, WaTEM/ SEDEM

SUMMARY

The water erosion is considered as the most important factor having impact on the agricultural land degradation. In the past, many methods of soil erosion processes by using mathematical models has been developed. The mostly applicated is the universal soil loss equation USLE. The USLE equation has been used as the basis for new erosion models WaTEM/ SEDEM (Van Rompaey a kol. 2001, Van Oost a kol. 2000, Verstraeten a kol. 2002) and USPED (Mitášová a kol., 1996). The two of them are applicated in the experimental catchement of Černíči. The WaTEM/ SEDEM model is able to count the river sediment export as well. The intensity of erosion processes is increasing during extraordinary rainfall – runoff events. This thesis is evaluating their causes, frequency and course from two points of view: the course of runoff and the sediment transport. The water quality is also evaluated.

KEY WORDS: erosion, extraordinary rainfall – runoff event, USPED, WaTEM/ SEDEM

OBSAH

1. Úvod a cíle práce	7
2. Literární rešerše problematiky eroze půdy a vlivu mimořádných srážko-odtokových událostí na kvalitu vod a transport plavenin	9
2.1. Eroze půdy	9
2.1.1. Metody výzkumu erozních procesů	11
2.1.2. Zkušenosti s modelem WaTEM/ SEDEM v ČR a v zahraničí	14
2.1.3. Zkušenosti s modelem USPED v ČR a v zahraničí	17
2.2. Transport plavenin a změny kvality vody při mimořádné srážko-odtokové události	18
2.2.1. Odnos plavenin	19
2.2.2. Ztráty fosforu.	19
2.2.3. Ztráty dusíku.	20
2.2.4. Ztráty uhlíku	22
2.2.5. Ztráty ostatních látek	22
2.2.6. Ztráty N a P v České republice.	23
2.2.7. Následky eutrofizace vod	23
2.2.8. Metody hodnocení kvality vod a transportu plavenin	24
3. Metody a zdroje dat	26
3.1. Hodnocení srážko-odtokových poměrů	26
3.2. Hodnocení kvality vody a transportu plavenin	27
3.3. Výpočet erozního ohrožení pomocí modelů	28
3.3.1. Charakteristika modelu USPED	29
3.3.2. Postup zpracování modelu USPED	30
3.3.3. Charakteristika modelu WaTEM/ SEDEM	32
3.3.4. Postup zpracování modelu WaTEM/ SEDEM	33
3.3.5. Rozbor jednotlivých erozních faktorů	39
3.4. Mapové a datové zdroje	43
4. Zájmové povodí Černíči	45
4.1. Fyzickogeografická charakteristika zájmového území	45
4.1.1. Geologie a geomorfologie	46
4.1.2. Klimatické poměry	49
4.1.3. Hydrologické poměry	51
4.1.4. Půdní pokryv	51
4.1.5. Využití území	54
4.2. Výzkum v Černíči	62
4.2.1. Měření hydrometeorologických charakteristik	63
4.2.2. určení složek hydrologické bilance	65
4.2.3. Analýza kvality vody	66
4.2.4. Transport anionů půdním profilem.	69
4.2.5. Eroze a odnos splavenin	69
4.2.6. Aplikace hydrologického modelu KINFIL	75

4.2.7. Rozsah a funkce odvodňovacích systémů	75
5. Srážkové a odtokové charakteristiky.....	78
5.1. Srážkové charakteristiky.....	78
5.1.1. Roční úhrny srážek.....	78
5.1.2. Sezónní a měsíční úhrny srážek	79
5.1.3. Denní úhrny srážek	82
5.2. Odtokové poměry	84
5.2.1. Odtokové charakteristiky	84
5.2.2. Denní průtoky	85
5.2.3. Měsíční průtoky	86
5.2.4. Roční průtoky.....	89
5.3. Mimořádné srážko-odtokové události	90
5.3.1. Příčiny mimořádných událostí.	91
6. Sledování kvality vody a transportu plavenin	99
6.1. Koncentrace látek a transport plavenin během mimořádných událostí	103
7. Erozní ohrožení v Černíči	104
7.1. Výsledky modelu USPED	104
7.2. Výsledky modelu WaTEM/ SEDEM	107
7.3. Výsledky rovnice USLE.....	111
7.4. Současné projevy eroze v Černíči	113
7.4.1. Eroze v důsledku tání sněhu.....	113
7.4.2. Eroze během mimořádných srážko-odtokových událostí	114
8. Diskuse	118
8.1. Hodnocení srážko-odtokových poměrů	118
8.2. Kvalita vody a sledování transportu plavenin.....	119
8.3. Hodnocení erozních procesů v povodí.....	121
9. Závěr	124
Seznam grafů.....	125
Seznam tabulek	126
Seznam obrázků	128
Seznam zkratk	130
Seznam použité literatury a zdrojů	131

1. Úvod a cíle práce

Půda je základním přírodním bohatstvím, které zaručuje zachování socio-ekonomických a ekologických systémů na Zemi. Neslouží pouze jako zdroj obživy a surovin pro obyvatele celé Země, ale vždy udávala rozvoj lidských sídel a infrastruktury. Půda jako taková je důležitou součástí kulturního dědictví, protože odnepaměti určovala vzhled krajiny. Zachovává svědectví o minulosti člověka. V neposlední řadě je půda zdrojem biodiverzity. I přes nepostradatelnou roli, kterou půda plní, nejsou její význam a funkce plně doceněny. Odolnost půdy vůči přírodním i antropogenním vlivům vykazuje změny, které by nás měly přimět se více zabývat její ochranou (EEA, 2007).

Významným faktorem, který vede k degradaci půdy, je zrychlená eroze. V České republice je vodní erozí postiženo přibližně 50 % a větrnou asi 10 % ploch orné půdy. Půda postižená erozí vykazuje zhoršené fyzikálně-chemické vlastnosti, změny zrnitostního složení, sníženou úrodnost a zmenšenou mocnost půdního profilu (Janeček, 2007).

Základní podmínkou pro vznik eroze je povrchový odtok, který je vyvolán dešťovou srážkou vyššího úhrnu či intenzity. Při selektivním procesu eroze dochází k uvolnění nejprve menších a lehčích půdních částic, které se dostávají do vodního toku a tvoří svým množstvím a objemem nejvýznamnější faktor znečištění vod. Na půdní částice jsou vázány látky, které se spolu s nimi dostávají do vodních toků. Dochází ke snížení kvality vody, k zanášení koryt toků a vodních nádrží. Produkty eroze se částečně usazují na úpatích svahů.

Ke sledování míry eroze slouží mnoho metod. Vedle přímého pozorování v terénu, existují matematické modely, které usnadňují určení míry eroze a označují ohrožená území. Pomocí erozních modelů lze předvídat dopady změn ve využití půdy na míru eroze nebo rekonstruovat tyto procesy v minulosti. Příkladem erozních modelů jsou WaTEM/ SEDEM a USPED, které jsou použity v této práci.

Erozní procesy se negativně odrážejí i na kvalitě vody. Uvolněné půdní částice na sebe vážou sloučeniny dusíku a fosforu, které způsobují eutrofizaci vodního prostředí. Dopad eroze půdy na kvalitu vody lze vysledovat pomocí analýzy vzorků vody.

Pro sledování zmíněných jevů je zvoleno experimentální povodí Černíčí spravované Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půd, v. v. i. Pozornost je věnována charakteristice výzkumného povodí, kvantifikaci erozně nebezpečných srážek a jejich příčin a aplikaci erozních modelů.

Cílem práce „Hodnocení erozních procesů pomocí modelů WaTEM/ SEDEM a USPED“ je:

- Charakteristika zájmového povodí Černíčí se zřetelem na fyzickogeografické podmínky a dosavadní výzkum v lokalitě
- Analýza srážko-odtokových poměrů v Černíčí s důrazem na četnost a příčiny mimořádných srážko-odtokových událostí v Černíčí
- Sledování eroze, množství plavenin a charakteristik látkového odnosu během mimořádných srážko-odtokových událostí v Černíčí
- Aplikace erozních modelů WaTEM/ SEDEM a USPED

Ke splnění cílů práce je použit následující postup:

- Rešerše za účelem získání informací o zájmovém povodí s důrazem na dříve proběhnutý výzkum
- Literární rešerše problematiky kvality vody a transportu plavenin za mimořádných srážko-odtokových událostí
- Získání prostorových dat
- Vyhodnocení srážko-odtokových dat
- Vyhodnocení dat o kvalitě vody a transportu plavenin
- Příprava vstupních dat do modelů WaTEM/ SEDEM a USPED
- Aplikace a kritické zhodnocení výsledků modelů

Nedílnou součástí postupu je průběžné terénní sledování projevů erozních procesů v povodí.

2. Literární rešerše problematiky eroze půdy a vlivu mimořádných srážko-odtokových událostí na kvalitu vod a transport plavenin

V důsledku přívalových srážek, vyznačujících se vysokým úhrnem a intenzitou, narůstá zároveň i intenzita vodní eroze. Vlivem kinetické energie dešťových kapek dochází rozrušování půdního povrchu. Půdní částice uvolněné erozí částečně sedimentují přímo v povodí. Část uvolněných nerozpuštěných půdních částic a na ně vázaných organických látek se dostává dále do vodních toků. Narůstá množství plavenin a dochází ke změnám kvality vod.

2.1. Eroze půdy

Autoři Šarapatka, Dlapa a Bedrna (2002) nazývají erozi půdy proces, kdy dochází k rozrušování půdy činností vody, větru, ledu atd. a její přemísťování do jiných míst, kde dochází k akumulaci půdních částic. V závislosti na podmínkách se projevuje buď samostatně, nebo v kombinaci s jinými faktory“. Podobnou definici uvádí i Janeček (2002), který definuje erozi jako „komplexní proces, zahrnující rozrušování půdního povrchu, transport a sedimentaci půdních částic působením vody, větru, ledu a jiných tzv. erozních činitelů“.

Eroze je přirozený jev, který se podílí na utváření krajiny. Jejím působením se povrch v některých místech snižuje a v jiných naopak vyvyšuje. Výsledkem tohoto procesu je zarovnávání zemského povrchu. Základem pro planační proces je zvětrávání hornin. Čím kypřejší je zvětralinový plášť, tím intenzivněji může zvětrávání probíhat (Janeček, 2002).

Bennet (in Janeček, 2002) rozlišuje erozi normální neboli geologickou, kterou označuje jako přirozenou, a erozi zrychlenou. Ke zrychlené erozi dochází po změně přírodních podmínek lidskou činností, její intenzita je 10-1000 krát vyšší než eroze přirozená. Zrychlená eroze zapříčiňuje degradaci půdy a devastaci krajiny (Šarapatka, Dlapa, Bedrna, 2002).

Vodní eroze způsobená dešťovými srážkami působí na nechráněný půdní povrch. Dešťové kapky rozrušují kinetickou energií půdní agregáty a uvolňují půdní částice. Pakliže je intenzita a úhrn deště vyšší než infiltrační schopnost půdy, dochází k zaplnění mikroakumulačních prostor v půdě a začíná docházet k povrchovému odtoku. Stékající voda se postupně soustřeďuje v místech, kde půda není dostatečně chráněna vegetací, působí erozně a vytváří zde rýžky, rýhy až strže. Při plošné erozi je půda erodována rovnoměrně na celé ploše pozemku nebo části svahu. Čím je sklon svahu menší, tím jsou podmínky pro soustřeďování odtoku menší. I na rovných plochách však dochází k vzniku drobných rýžek (Bedrna, Tlapa, Šarapatka, 2002).

Vodní eroze působí selektivně. Při malé kinetické energii bývají vyplavovány nejjemnější částice, čímž se na povrchu půd vytváří hrubozrnná vrstva skeletu. Snížením sklonu terénu nebo rozptýlením povrchového odtoku dochází k sedimentaci půdních částic. Nejdříve se usazují nejhmotnější částice, proto dolní části pozemků bývají tvořeny hrubozrnným materiálem. Jemnější materiál vniká do vodních toků a je v podobě plavenin transportován a ukládán ve formě dejekčních kuželů ve vtocích do vodních nádrží nebo na jejich dně. Nejčastějším původcem půdních částic je smyv z orné půdy. Výrazně se však projevují plochy stavenišť, lesní plochy poškozené těžbou dřeva nebo břehy koryt vodních toků (Janeček, 1992; Janeček, 2002).

Přírodní a člověkem ovlivněné podmínky udávající vznik, průběh a intenzitu erozního procesu označuje Janeček (2002) jako faktory. Příčiny vodní eroze rozděluje na:

- 1) klimatické a hydrologické (nadmořská výška; zeměpisná poloha; množství, rozdělení a intenzita srážek; povrchový odtok; teplota, oslunění, výpar; výskyt, směr a síla větrů),
- 2) morfologické (sklon území; délka a tvar svahů; expozice, návětrnost),
- 3) geologické a půdní (povaha horninového substrátu; půdní typ a druh; textura a struktura půdy, její vlhkost a zvrstvení, obsah humusu),
- 4) vegetační (hustota a délka trvání vegetačního pokryvu),
- 5) způsob využívání a obhospodařování půdy (poloha a tvar pozemků; směr a technologie obdělávání; střídání plodin).

Důvodem, proč se zabývat výzkumem zrychlené eroze půdy, jsou její negativní důsledky pro člověka a krajinu. Vlivem eroze dochází na orných půdách k trvalému smyvu nejúrodnější vrstvy půdy, snižuje se schopnost půdy vázat živiny, dochází ke změnám pH. Vlivem změny zrnitostního složení půdy dochází ke zvýšení skeletovitosti půdy a tím k zhoršení její obdělávatelnosti. Eroze vede ke snížení výnosů ze

zemědělských půd, které jejím negativním působením ztrácí úrodnost. V jarním období může docházet ke ztrátám na osivu. Dalšími negativními důsledky mohou být zanášení vodních nádrží, koryt vodních toků, zvýšený transport látek ve vodních tocích nebo poškozování intravilánu (Dostál, 2007).

2.1.1. Metody výzkumu erozních procesů

K hodnocení rozšíření a míry eroze se užívá mnoho metod. Výběr vhodné metody se odvíjí od velikosti sledovaného území a účelu výzkumu. Většina metod je založena na terénním průzkumu, který poskytuje základ pro sběr a rozbor potřebných dat. Zkoumá se prostorové rozložení erozně-akumulačních tvarů v terénu a jejich vzájemné vztahy s využitím půdy a krajinnými prvky. Boardman (2007) rozděluje metody výzkumu erozních procesů podle velikosti zájmového území na: metody vhodné pro malá území (malá povodí, jednotlivá pole), metody pro středně velká území (střední povodí, okresy) a metody vhodné pro velká území (velká povodí, kraje, státy). Navíc vyčleňuje i globální metody výzkumu eroze.

Hodnocení eroze v malých povodích se provádí terénním průzkumem, během kterého probíhá mapování erozních rýh a strží. Erozní rýhy lze měřit v případě výrazných a nepravidelných tvarů jednotlivě, nebo v případě menších a čtenějších pomocí průřezů kolmých ke směru rýh. Tyto metody lze kombinovat. Pomocí této metody se dá relativně přesně zjistit objem erozních rýh. Metoda lze u větších povodí doplnit o údaje z měření koncentrace nerozpuštěných látek v závěrovém profilu (Tippl, 2001) nebo mapováním výskytu koluvií (Boardman, 2007).

Za účelem sledování erozních procesů na územích malé rozlohy jsou zřizovány pokusné plochy, které jsou v místě výtoku z pozemku vybaveny měřicími přístroji pro sledování odtoku pro měření povrchového odtoku a erozního smyvu. Pokusné plochy usnadňují pozorování při změnách kultur či způsobu obdělávání půdy. Často bývají vybaveny simulátory deště. Příkladem výzkumné plochy v České republice je lokalita Třebsín (obr. 2.1), která čítá devět výzkumných ploch o rozměrech 7 x 35,7 m (Slámová, 2007). Boardman (2007) však upozorňuje, že údaje z pokusných ploch se velmi těžko extrapolují do měřítek celých povodí. Hodnoty naměřené na pokusných pozemcích bývají vyšší než reálná eroze na zemědělských plochách, proto i erozní modely založené pouze na pozorování projevů eroze na pokusných plochách bývají nespolehlivé.

Obrázek 2.1: Pokusné plochy v Třebsíně – simulátor deště a výtok z pokusného pozemku



Foto: staženo z www.vimevite.cz, 6. 2. 2010

Metodou výzkumu erozních procesů na územích středních a velkých měřítek je měření transportu plavenin ve vodním toku. Na základě objemu plavenin, který je určen měřením v závěrovém profilu lze odhadnout míru eroze v povodí. Na stejném principu lze odhadnout míru eroze i kvantifikací množství sedimentů usazených na dnech vodních nádrží (Krása, 2004). Trimble (in Boardman, 2007) však zdůrazňuje, že míra eroze může být výrazně odlišná než tento odhad. Produkty eroze se totiž mohou usazovat v rámci povodí, což vede k podhodnocení míry eroze nebo naopak může dojít k erozi břehů a koryta, což míru eroze v povodí nadhodnocuje.

Pro hodnocení projevů eroze na velkých územích lze dobře využít snímky pořízené při dálkovém průzkumu Země. Při dostatečném rozlišení snímků jsou erozní formy dobře identifikovatelné. Výhodou metody je snadné určení změn v různých časových horizontech. Letecké snímky je nutné pořídit v době, kdy jsou erozní formy ze snímku patrné (bez sněhové pokrývky, bujné vegetace apod.) (Boardman, 2007).

K určení erozního ohrožení se velmi často využívá odborný odhad, který se odvíjí od předchozích vědeckých poznatků. Moderním nástrojem, na kterém lze založit odborný odhad pro území, je matematické modelování. Modelování erozních (erozně – akumulčních procesů) umožňuje identifikovat místa náchylná k vzniku erozních forem a odhadnout ztrátu půdy erozí v různém měřítku.

Erozní modely lze dělit na základě několika kritérií (Dostál, 2007):

- 1) způsobu výpočtu (fyzikálně založené, empirické)
- 2) popisu zahrnutých veličin (stochastické, deterministické)
- 3) prostorového členění řešené oblasti (celistvé, geometrické dělené)

- 4) délky časové základny (kontinuální, epizodní)
- 5) velikosti řešené plochy (povodí, pozemek, profil)
- 6) účelu (výzkumné, aplikační)

Jakubíková (2008) rozděluje erozní modely na dvě skupiny: empirické a simulační. Empirické modely vycházejí z analýzy dlouhodobého experimentálního měření v terénu a vlivů jednotlivých faktorů na erozi. Hodnotí erozi z dlouhodobého hlediska. Výhoda empirických modelů tkví především v relativně malé náročnosti na vstupní data, za nevýhodu lze naopak považovat jejich omezenou schopnost popisu časové a prostorové homogenity srážek a ostatních faktorů.

Nejznámějším empirickým modelem je USLE, resp. RUSLE, revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy (Wishmeier, Smith in Janeček, 2007). Dlouhodobá průměrná roční ztráta erozí je zde vyjádřena rovnicí:

$$G = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P,$$

kde:

G = průměrná dlouhodobá ztráta půdy [$t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$],

R = faktor erozní účinnosti dešťů [$MJ \cdot ha^{-1} \cdot cm \cdot h^{-1}$],

K = faktor erodibility půdy [$t \cdot MJ^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot h$],

L = faktor délky svahu [bezrozměrná vel.],

S = faktor sklonu svahu [bezrozměrná vel.]

LS bývá také souhrnně nazýván topografický faktor,

C = faktor ochranného vlivu vegetačního pokryvu [bezrozměrná vel.],

P = faktor účinnosti protierozních opatření [bezrozměrná vel.].

Z rovnice USLE, resp. RUSLE vycházejí i další modely. Jedná se například o modely WaTEM/SEDEM a USPED, které budou popsány v kapitole 3.3.1. a 3.3.3. Z dalších empirických modelů lze uvést model založený na multikriteriálním bodovém ohodnocení hlavních erozních faktorů (Kliment, Langhammer, 2005) nebo model SPADs (Vente a kol., 2008).

Simulační modely vycházejí z fyzikálního popisu erozního procesu, který se jako přírodní jev skládá z několika fází: uvolnění půdních částic působením deště nebo povrchového odtoku, jejich přemístění pomocí povrchového odtoku a ukládání. Simulační modely řeší matematickým zpracováním prostorový a časový průběh erozního procesu. Rozvoj simulačních modelů byl umožněn díky vývoji informačních technologií. Oproti empirickým modelům poskytují přesnější výsledky, avšak jsou

náročnější na kvalitu a množství vstupních dat, výpočetní techniku a kalibraci (Schramm, 1994). Jako příklady simulačních modelů lze uvést EROSION 2D/3D, EUROSEM, LISEM, KINEROS, SWAT, AnnAGNPS (Jakubíková, 2008).

Vedle empirických a simulačních modelů existují i modely konceptuální, které popisují zákonitosti procesů ve zjednodušené formě a připouštějí i empirické vztahy. Na rozdíl od empirických modelů však umožňují výpočet eroze a odnosu plavenin i pro jednotlivé srážko-odtokové události. Konceptuální modely rovněž popisují a hodnotí i další faktory a procesy, např. infiltraci, nasycení půdy, růst rostlin a erozně-sedimentační děje v říční síti (Kadlec, 2007).

Při výběru vhodného modelu je nutné zohlednit mnoho faktorů. Použitá metoda výpočtu se odvíjí podle Schramma (1994) především od účelu použití modelu. Významnou roli hrají dostupnost a cena vstupních dat, velikost území a propojení s informačními systémy. Klíčové jsou především požadavky na operační systém počítače, technická podpora výrobce a návaznost na GIS.

Výběr modelu v povodí Černíči se odvíjel nejen od velikosti území a množství dostupných dat, ale také od nekomerční povahy obou modelů. Na základě zvážení všech faktorů a provedené rešerše byly zvoleny modely WaTEM/ SEDEM a USPED. K volbě modelu WaTEM/ SEDEM přispěl fakt, že má srozumitelné uživatelské rozhraní a online technickou podporu. Výrobci modelu neomezují jeho použití na určitou velikost území. Model USPED je jednoduchý fyzikální model zpracovatelný v běžném prostředí GIS a je určen pro malá povodí. Vzhledem k poměrně malým zkušenostem s aplikací modelů byla zohledněna snaha přispět touto prací k získání zkušeností v českých podmínkách.

2.1.2. Zkušenosti s modelem WaTEM/ SEDEM v ČR a zahraničí

O modelu WaTEM/ SEDEM existuje několik desítek publikací převážně z Evropy. Model byl aplikován nejčastěji na středně velkých povodích, i přesto, že autoři velikost území pro tento model nijak neomezují. Nejvíce publikací pochází z Belgie, kde bylo uskutečněno testování modelu v povodí různých velikostí. Van Oost a kol. (2005) prováděli na dvou malých povodích v Belgii, Ganspoelu a Kinderveldu, sběr a hodnocení dat o srážkách, povrchovém odtoku a odnosu sedimentů. Takto získaná data posloužila k evaluaci a parametrizaci modelu WaTEM/ SEDEM. Verstraten (2006) se zabýval především kalibrací koeficientu transportní kapacity. Zjistil, že v hodnotách

kTc pro velká a malá povodí není velký rozdíl, upozornil však, že hodnoty kTc jsou při menším rozlišení DEM nižší. V povodí Scheldt dosáhl po validaci shody 0,79 a doporučil model k dalšímu použití. Peeters a kol. (2006) použil model k rekonstrukci reliéfu v malém povodí v belgickém sprašovém pásmu během Holocénu. Model ocenil jako výborný nástroj k tomuto účelu, poukázal však i na dva nedostatky: WaTEM/ SEDEM se špatně potýká s modelováním přechodu mezi oblastí eroze a oblastí sedimentace a podhodnocuje hodnotu poměru odnosu. Selhání vycházelo podle autora z omezených technických možností modelu a podcenění extrémních událostí. Ward a kol. (2009) použil model WaTEM/ SEDEM pro rekonstrukci odnosu sedimentů v Holocénu v závislosti na změnách krajinného pokryvu v povodí řeky Meuse. Pomocí modelu usoudil, že na erozní a sedimentační procesy měly vliv především změny krajinného pokryvu, a upozornil, že citlivost krajiny na změny klimatu roste se vzrůstajícím podílem odlesněné půdy. Roysschaert a kol. (2008) aplikoval WaTEM/ SEDEM jako pomocnou metodu k modelování ztráty půdy erozí při různém využití zemědělské půdy v celé Belgii. V rámci výzkumu podpovrchové eroze Verachtert a kol. (2010) využil model WaTEM/ SEDEM k lokalizaci zdrojových oblastí erozí uvolňovaných půdních částic.

V Itálii (Van Rompaey a kol., 2005) proběhlo testování modelu na 40 povodích různého charakteru a rozlohy (rozmezí jednotek až stovek km²). Model podle této studie vykázal velmi špatné výsledky v horských oblastech, naopak v nehorských oblastech s mírným vlhkým klimatem se jevily výsledky uspokojivě. Selhání modelu autoři vysvětlili přílišnou simplifikací problému, jmenovitě dvěma skutečnostmi: v horském prostředí probíhá mnoho náhlých extrémních událostí, které model nebere v úvahu; horní toky řek se hluboce zařezávají a uvolňují větší množství materiálu, které model nezohledňuje. Pro lepší výsledky autoři doporučili užívat DEM s co největším rozlišením.

Ve Slovinsku se Keestra (2009) pokoušel pomocí modelu WaTEM/ SEDEM rekonstruovat vliv krajinných změn po druhé světové válce v povodí řeky Dragonja. Výběr modelu zde vycházel z analýzy textury sedimentu, kde vyšlo najevo, že převážná většina z nich pochází ze svahové eroze. Model WaTEM/ SEDEM jiný zdroj sedimentu zanedbává. Keestra (2009) vyhodnotil výsledky modelu za velmi dobré, i přesto, že nebyla dostupná potřebná vstupní data v plném rozsahu. Kombinaci erozního modelování a jiných metod aplikovala i studie povodí řeky Geul v Nizozemsku. Moor a Verstraten (2008) hodnotili pomocí WaTEM/ SEDEM a geomorfologického průzkumu

původ sedimentů v koluviích a provedli rekonstrukci krajinných změn od pozdního Holocénu.

Netradiční využití modelu ukázala studie Bakker a kol. (2005). Autorka provedla na řeckém ostrově Lesbos pomocí modelu WaTEM/ SEDEM a statistických metod změn rekonstrukci využití půdy v závislosti na erozi. Pole, kde docházelo k degradaci půdy, byla opuštěna a přeměňována v pastviny, naopak lidé obsazovali pozemky s hlubší půdou a nižší mírou eroze.

Porovnáním modelu WaTEM/ SEDEM a jiných erozně-sedimentačních modelů se zabýval Vente a kol. (2008), který prováděl srovnání modelů WaTEM/ SEDEM, PESERA a SPADs v 61 povodích ve Španělsku.

Model WaTEM/ SEDEM byl také použit pro odhad sedimentů, které se dostávají se vodních nádrží prostřednictvím vodních toků. Příkladem takovýchto výzkumů je aplikace modelu v povodí Kali v Maďarsku (Jordan a kol., 2005) nebo povodí vodní nádrže Vrchlice (Krása a kol., 2005). Výsledky se jevily jako velmi slibné, autoři doporučili další testování a kalibrování modelu v českých podmínkách.

V České republice se modelem zabývala Katedra hydromeliiorací a krajinného inženýrství ČVUT. WaTEM/ SEDEM byl použit při modelování vlivu změn krajinného pokryvu na erozní procesy po druhé světové válce (Van Rompaey a kol. 2007). Autoři si kladli za cíl model aplikovat a kalibrovat, na základě současných trendů v krajině určit pomocí modelu vliv různých scénářů na erozi a tyto změny kvantifikovat. Kalibraci prováděli v několika modelových povodích, validaci poté v povodí Orlice. Nejvyšší účinnosti modelu $ME = 0,58$ bylo dosaženo pro hodnoty $kTc = 50$ m pro ornou půdu a $kTc = 20$ m pro TTP a lesy. Pomocí modelu předpověděli, že snížení průměrné rozlohy parcel na 30 ha by snížila odnos sedimentů o 30 %, vytipovali kritická místa eroze a navrhli prostorové rozmístění změn v krajině. Na stejném pracovišti vznikla i disertační práce (Krása, 2004), která se zabývá aplikací modelu WaTEM/ SEDEM v českých podmínkách na velkých územních celcích.

Mimo Evropu byl model WaTEM/ SEDEM byl úspěšně kalibrován a aplikován v jihovýchodní Austrálii v povodí řeky Murrumbidgee (Verstraeten a kol., 2007). Ve sprašových oblastech Číny provedl Feng a kol. (2010) kalibraci modelu na základě dat získaných metodou cesia 137. WaTEM/ SEDEM se podle této studie osvědčil v určení prostorového rozmístění eroze, nikoli však v odhadu množství sedimentu. Příčiny nedokonalostí vidí v simplifikaci fyzikálních dějů během eroze.

Většina autorů se shoduje, že WaTEM/ SEDEM je vhodný nástroj k modelování erozních a sedimentačních procesů, protože nabízí rychlý, přehledný a relativně jednoduchý způsob výpočtu s omezeným vstupem dat. Model může být aplikován na území libovolné velikosti. Nespornou výhodou modelu je volná dostupnost. Za nevýhodu modelu je považováno zjednodušení fyzikálních procesů během eroze a zanedbávání extrémních událostí.

2.1.3. Zkušenosti s modelem USPED v ČR a zahraničí

Modelem USPED se doposud zabývalo velmi málo publikací. USPED byl testován na povodích různých měřítek. Warren a kol. (2005) testovali model USPED na malém povodí Ford Hood v Texasu a srovnávali se dvěma modely založenými na rovnici USLE. Výsledky porovnávali s hodnotami naměřenými pomocí metody cesia-137. V rámci této studie byl model USPED aplikován na další dvě povodí v USA. Autoři vyhodnotili model USPED velmi kladně. Zatímco oba modely založené na rovnici USLE nadhodnotili míru eroze, odhad pomocí USPED byl přesný a srovnatelný s výsledky terénního měření.

Pistocchi a kol. (2002) použil model USPED k modelování erozního ohrožení v povodí řeky Romagna v Itálii. Na základě kombinace USPED s modelem SHALSTAB, který předpovídá sesuvy půdy, sestavil pokyny k ochraně půdy v povodí.

Pelacani a kol. (2008) se pokoušela odhadnout míru eroze v horním povodí řeky Orme v Itálii pro tři různé časové horizonty. Důraz kladla především na parametrizaci faktoru protierozních opatření P a doporučila postup zpracování faktoru P v GIS i bez znalosti dat z minulosti. Bez započítání faktoru P model USPED míru eroze nadhodnocuje.

S aplikací modelu USPED se setkáme i na Slovensku. Stankoviansky a kol. (2009) se z důvodu nárůstu počtu bahenních povodní v Myjavské pahorkatině zabýval změnami erozního ohrožení v důsledku kolektivizace zemědělské půdy po roce 1950. Ke srovnávací analýze použil modely USLE a USPED. Podle obou modelů byla eroze v roce 1990 výraznější než v roce 1955.

V českých podmínkách byl model USPED v diplomové práci Bek (2007) na Katedře fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty UK. Model USPED použil jako jednu z metod pro určení lokality výskytu a mocnosti koluvizemí.

2.2. Transport plavenin a změny kvality vody při mimořádné srážko-odtokové události

Půdní částice uvolněné erozí, které nesedimentují přímo v povodí, se dostávají do hydrografické sítě. Nazývají se splaveniny. Podle způsobu transportu se rozlišují plaveniny, které jsou přemísťovány v suspenzi proudící vodou, a dnové splaveniny, které se pohybují vlečením po říčním dně (Gabrielová, 1998). Je zřejmé, že během přívalových srážek množství splavenin ve vodním toku narůstá. Kromě eroze dochází i k protékání vody půdním profilem. Podle Tippla (1998) se množství živin vyplavených z půdy během mimořádné srážko-odtokové události odvíjí od množství vyplavitelné látky v půdním profilu, množství vody, které profil promývá a délky období, po které k vyplavování dochází. V důsledku těchto procesů dochází ke změnám chemického složení vody. Chemické látky jsou buď přímo vázány na plaveninách, nebo jsou rozpuštěny v povrchových vodách.

Splaveniny jsou podle Duba (in Janeček, 2002) ve 40-90 % menší než 0,5 mm, zbytek směsi tvoří částice o velikosti 0,05-0,5 mm. Sedimentovaný materiál obsahuje vyšší množství organických, jílových a prachových částic než půdy, ze kterých pochází. Poměr látek v erodovaném materiálu a v původní půdě se nazývá jako poměr obohacení ER - enrichment ratio (Janeček, 2002).

Podle Janečka (2002) je vodní erozí nejčastěji ze zemědělské půdy vyplavován fosfor a dusík. Tyto látky obohacují povrchové vody a vedou ke vzniku antropogenně podmíněné eutrofizace. Rozpustnost živin je závislá na mnoha faktorech např. na teplotě vody a na obsahu kyslíku. Za nadměrnou považuje míru eutrofizace vod, kdy koncentrace anorganického dusíku přesáhne $0,3 \text{ mg.kg}^{-1}$ a anorganického fosforu $0,015 \text{ mg.kg}^{-1}$. Přítomnost živin v půdě je dána činností mikroorganismů, díky kterým probíhá přeměna látek. Tento proces závisí na pěstované kultuře, vlastnostech půdy, agrotechnických postupech, používání hnojiv a pesticidů apod.

Výzkumem kvality vody během mimořádných srážko-odtokových událostí se v minulosti již věnovalo několik výzkumů ve světě i v České republice. Většinou byl důraz kladen na průběh koncentrací nerozpuštěných půdních částic NL, dusíku N, fosforu P nebo uhlíku C během mimořádných odtokových vln nebo na vyhodnocení celkové ztráty těchto látek během srážek. Vědci se snažili hledat souvislosti mezi látkovým odnosem a úhrnem a intenzitou srážky nebo využitím půdy. Výzkumy byly prováděny buď přímým měřením při srážkách, nebo pomocí simulátoru deště. Závěrové

profily povodí byly vybaveny přístroji k měření průtoků a vzorkovačem na odběr vzorků vody během odtokové vlny.

Obrázek 2.2: Vodní tok znečištěný produkty eroze půdy (profil Černíčí)



Zdroj: foto P. Pražák

2.2.1. Odnos plavenin

Odnos nerozpuštěných látek je ovlivněn dvěma faktory: transportní kapacitou povrchového odtoku a množstvím materiálu, který lze uvolnit (Rimal a kol., 2009). Zatímco během plošné eroze jsou selektivně odnášeny jemné částice, rýhová eroze uvolňuje i hrubozrnné částice (Kim a kol., 2006). Odnos NL během mimořádných událostí narůstá a může tvořit i 90 % celkového ročního odnosu NL z povodí (Ramos a kol., 2004). Koncentrace NL v odtékající vodě je přímo úměrná průtoku, ale nepřímo úměrné intenzitě srážky (Zhang a kol., 2008). Podle Drewry a kol. (2009) byla koncentrace NL vyšší, pakliže události předcházelo suché období. Vrchol koncentrací NL nastává podle Yang a kol. (2009) a Drewry a kol. (2009) před vrcholem odtokové vlny. Na jemné půdní částice jsou vázány další živiny.

2.2.2. Ztráty fosforu

Fosfor je do zemědělské půdy ve velké míře uměle dodáván. Podle Kulované (2001) je však veškerý P vázán v místě aplikace a vzniká nepoměr mezi výskytem P v ornici a v podorníci. Velké ztráty P erozí půdy jsou způsobeny jeho vazbou na jemné půdní částice (Balls a kol., 1997; Drewry a kol., 2009). Odnos P narůstá s intenzitou a úhrnem srážky (Zhang a kol., 2008). Koncentrace P v povrchových vodách jsou přímo úměrné průtoku (Balls a kol., 1997; Kim a kol., 2006; Drewry a kol., 2009; Zhang a kol., 2008),

ale nepřímo úměrné intenzitě srážky (Zhang a kol., 2008). Kim a kol. (2006) si zároveň povšimnul, že koncentrace P a její vrchol během odtokové vlny se odvíjí od předchozího zamokření. Po suchých obdobích je koncentrace P vyšší a její vrchol nastává před vrcholem odtokové vlny, po vlhkých obdobích až po vrcholu odtokové vlny. Drewry a kol. (2009) a Yang a kol. (2009) určili, že většina P je transportována v nerozpuštěné formě. Podle Yang a kol. (2009) je nejvyšší poměr nerozpuštěného a rozpuštěného P ve vodě na začátku odtokové vlny a postupně klesá. Kim a kol. (2006) se zabýval odnosem P během mimořádných událostí z rýžovišť. Prokázal, že zatímco koncentrace P ve vodách odtékajících z nezamokřených rýžovišť vykazují pozitivní korelaci s průtokem, pod zamokřenými rýžovišti s průtokem nekorelují.

2.2.3. Ztráty dusíku

Dusík se v půdě vyskytuje v mnoha formách. Koloběh a množství dusíku v půdě jsou dány mnoha faktory. Podle Zhang a kol. (2008) je odnos celkového dusíku během mimořádné události vyšší než za průměrných podmínek. Podle Koláře in Brom (1987) tvoří 90-92 % odnosu dusíku z půdy NO_3^- . Na vyplavování dusíku mají pozitivní vliv vysoká propustnost půdy, vlhká období s vysokými srážkami a malým výparem, nahromadění dusíku v půdě z nevyužitých hnojiv. Určující vliv má i využití půdy a osevní postup. Lesy a louky vykazují menší ztráty než orná půda, nejvíce N je vyplavováno z úhoru (Tippl, 1998). Zmíněné faktory ukazují, že je velmi obtížné vysledovat chování dusíku během mimořádné události.

Yang a kol. (2009) při výzkumu zemědělského povodí v Číně vysledoval, že během odtokové vlny byly koncentrace NO_3^- čtyřnásobně vyšší než NH_4^+ . Koncentrace NO_3^- klesaly s rostoucím průtokem, naopak s klesajícím průtokem narůstaly. Na začátku odtokové vlny byly zaznamenány koncentrace především nerozpuštěného dusíku. Poměr nerozpuštěného a rozpuštěného celkového dusíku během odtokových vln klesal a na konci byl roven 1. NH_4^+ zaznamenal nízkou koncentraci během odtokových vln.

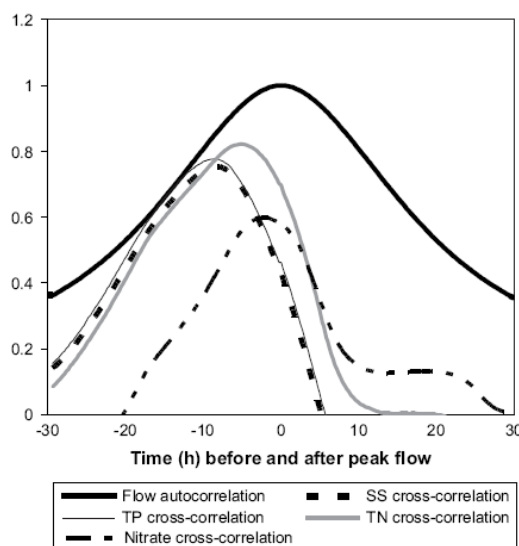
Balls a kol. (1997) sledoval během dvou přívalových srážek celkovou koncentraci oxidů N TON ($\text{TON} = \text{NO}_2 + \text{NO}_3$) v ústí řeky Ythan. Řeka Ythan je kvůli vysokému podílu zemědělské půdy (95 %) nejvíce dusíkem znečištěná řeka ve Skotsku. Měření při mimořádných událostech ukázalo, že koncentrace TON byla nepřímo úměrná průtoku.

V Jižní Koree byl sledován odnos N z rýžovišť (Kim a kol., 2006). Z výsledků studie vyplynulo, že koncentrace celkového N byly průběhu odtokové vlny nepřímo úměrné

průtoku (mimo období hnojení), Kim a kol. (2006) přisuzuje chování N během srážky hlavně přítomnému množství N v půdě. V době hnojení koncentrace N za odtokové vlny rostly.

Drewry a kol. (2009) zkoumal koncentraci N v odtoku z lesních povodí s cílem získat podkladová data pro matematické modely. Koncentrace NO_3^- rostla na začátku odtokové vlny, maxima dosáhla ještě před maximálním průtokem a následně začala klesat. V momentě poklesu průtoku, začala opět stoupat. Drewry a kol. (2009) usoudil, že koncentrace NO_3^- je méně vázaná na průtok nežli koncentrace celkového N. Obrázek 2.3 zobrazuje aproximovanou závislost koncentrací jednotlivých látek a průtoku.

Obrázek 2.3: Koncentrace látek během mimořádných srážko-odtokových událostí
(flow = průtok, SS = NL, TP = celkový P, TN = celkový N, nitrate = NO_3^-)



Zdroj: Drewry a kol. (2009)

V Japonsku byla prováděna komplexní studie 23 lesních povodí za účelem sledování změn koncentrací N a jeho forem při mimořádných událostech (Zhang a kol., 2008). Ze statistické analýzy vyplynulo, že odnos N (kromě NO_3^-) z povodí pozitivně koreluje s úhrnem, intenzitou a délkou trvání srážky. Koncentrace látek během odtoku korelují pozitivně alespoň se dvěma vlastnostmi srážek a negativně s intenzitou srážky. Jediná látka, u které se prokázala pozitivní korelace s intenzitou srážky, je NH_4 . Podle Zhang a kol. (2008) koncentrace N nejsou významné jenom kvůli velkému objemu vody.

2.2.4. Ztráty uhlíku

Výsledky výzkumů zaměřených na ztrátu C během mimořádných událostí ukazují, že vyšší intenzita a úhrn srážek způsobuje vyšší ztráty C z půdy (Rimal a kol., 2009, Jin a kol., 2009). Koncentrace C během odtokové vlny je podle Jacinthe a kol. (2004) nepřímou úměrnou intenzitě srážky. Srážky nižší intenzity způsobují vznik plošné eroze, během které jsou z půdy odplavovány především malé a lehké částice (Rimal a kol., 2009). Organický C je vázán na jemné částice jílu, protože ER jemných částic a ER organického C v sedimentech spolu pozitivně koreluje (Jin a kol., 2009, Rimal a kol., 2009, Jacinthe a kol., 2004). Ztráty C z povodí jsou nižší, pakliže se mimořádná událost odehrála po předchozím zamokření pozemků (Rimal a kol., 2009, Verseveld a kol., 2009). S předchozím zamokřením souvisí i trend koncentrace C během odtokové vlny (Rimal a kol., 2009). Jacinthe a kol. (2004) a Rimal a kol. (2009) se shodují, že uvolnění C z půdy povrchovým odtokem závisí na obsahu C v půdě a na vegetačním pokryvu, který chrání půdní agregáty před ničivými účinky deště. Ztráty C z půdy jsou nejvyšší při vegetační pokryvnosti 25 %, s rostoucí pokryvností klesají (Jin a kol., 2009). Rimal a kol. (2009) se zabýval vztahem obdělávání půdy, které má vliv na soudržnost půdních agregátů, a ztráty C. Nejvyšší ztráty byly naměřeny na zemědělské půdě obdělávané bez orby a hnojení a na orné půdě. Koncentrace anorganického C byla u všech typů využití půdy stejná, s měnící se intenzitou deště koncentrace C vykazovala stejný trend (Jacinthe a kol., 2004). Verseveld a kol. (2009) upozornil, že při vyhodnocení koncentrací C v povrchových vodách v důsledku eroze hraje velkou roli i přísun C z příbřežní zóny a koryta, který koncentrace C navyšuje.

2.2.5. Ztráty ostatních látek

Ztrátě jiných látek se dosud nevěnovalo příliš pozornosti. Ramos a kol. (2004) uvedl, že během přívalové srážky byl odnos draslíku z povodí (vinice v SV Španělsku) o 10 % vyšší než by nastal za průměrných podmínek. Balls a kol. (1997) vysledoval, že koncentrace silikátů během dvou mimořádných událostí nevýrazně poklesly

2.2.6. Ztráty N a P v České republice

V České republice bylo po povodních v roce 1997 vyčísleno množství dusičnanů a fosforu uvolněných z půdy během extrémních srážek (Tippl, 1998). Autor uvádí, že uvedené výsledky z povodí Moravy z roku 1997 představují extrémní mez, která může v našich podmínkách nastat. Odnosy dusíku ze zemědělské půdy představovaly v červenci 1997 v nejpostiženějších oblastech 40-80 % vyplavitelného dusičnanového dusíku v ornici, v oblastech méně zasažených 10-20 %. Z lesních půd v oblastech nezasazených exhalacemi činil odnos dusíku $1,1-1,3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{měsíc}^{-1}$, u zasažených lesů pak $2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{měsíc}^{-1}$. Odnosy ze zemědělské půdy v nejvíce zasažených oblastech dosahovaly až $10 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{měsíc}^{-1}$. Období vysokých odnosů dusíku trvalo přibližně ještě 2-3 týdny po srážkové události, protože došlo k nasycení a promytí půdního profilu vodou. Jako nejrizikovější skupina byla v roce 1997 označena kultura okopanin a kukuřice, kde dosahují hodnoty dusičnanového dusíku v ornici až stonásobně vyšších hodnot než v travních porostech, které jsou z pohledu obsahu dusíku v půdě nejpriznivější. Povodně v roce 1997 přišly v období nižších obsahů dusičnanů v půdě. Ve všech sledovaných tocích byl zjištěn zvýšený odnos fosforu v červenci 1997, v nejvíce postižených oblastech činil až $1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{měsíc}^{-1}$, což je znatelně vyšší hodnota oproti dlouhodobému průměru.

Sledování kvality vody a odnosu NL během mimořádných událostí bylo v minulosti prováděno i v Černíči. Výsledky těchto výzkumů jsou blíže popsány v kapitole 4.

2.2.7. Následky eutrofizace vod

Eutrofizace vod je proces, během kterého dochází k růstu obsahu minerálních živin zejména sloučenin N a P ve vodním prostředí s následným růstem biomasy. Jedná se o přirozený proces, který však při nadměrném přísunu N a P ze zemědělské činnosti a komunálních odpadů vede k změnám vodního prostředí (Sládeček in Langhammer, 2002).

Nejvýraznějším projevem eutrofizace jsou změny společenstev ve vodních nádržích. Při podporovaném růstu biomasy dochází ke změně barvy vody na modrozelenou až zelenou a na hladině se vytváří vodní květ. Dochází ke vzniku kyslíkového deficitu, který má negativní dopad na živé organismy. Eutrofizace se projevuje i změnami

chemických vlastností vod např. změnou pH vody, kyslíkového režimu a vzniku odlišných redukčních podmínek (Langhammer, 2002).

2.2.8. Metody hodnocení kvality vod a transportu plavenin

K hodnocení kvality vody ve vodním toku lze použít buď metody přímého pozorování, nebo matematické modelování. Jako základní údaj pro hodnocení kvality vody včetně hodnocení množství plavenin slouží výsledky laboratorních rozborů vzorků vody. Pro soustavné sledování musí být vzorky odebírány a analyzovány v pravidelných intervalech. Kvalitativní hodnoty vzorku jsou následně přisouzeny celému profilu. Pro hodnocení kvality vody během mimořádných srážko-odtokových událostí je třeba vzorky odebírat několikrát v průběhu odtokové vlny.

K hodnocení kvality vody se stále častěji používají matematické modely, které umožňují odhadovat kvalitu vody v dlouhodobém časovém měřítku. Pomocí modelů lze rovněž vytvářet simulace kvality vody na základě změn v povodí. Mezi modely, které slouží k simulaci jakosti vody v tocích, resp. šíření znečištění v otevřených korytech a vývoje kvality vody v závislosti na změnách vnějších podmínek, patří například QUAL 2E, MIKE 11, HEC-5, Q-sim nebo HydroTech (Langhammer, 2002).

K odhadu průměrného ročního množství splavenin lze použít metodu výpočtu poměru odnosu SDR (sediment delivery ratio), který je definován jako poměr ročního množství splavenin k celkové erozi v povodí.

$$SDR = 1,366 \cdot 10^{-11} \cdot A^{-0,0998} \cdot s_r^{0,3629} \cdot CN^{5,444},$$

kde A je plocha povodí [km^2], s_r je reliéfový poměr [m.km^{-1}] a CN číslo odtokové křivky. Průměrné roční množství splavenin se stanoví redukcí hodnoty celkové roční eroze v povodí poměrem SDR (Janeček, 2007). Celková roční ztráta půdy erozí se pro zemědělskou půdu určí pomocí USLE a pro ostatní půdy doplní odborným odhadem.

Pro odhad množství splavenin během odtokové vlny způsobené přívalovým deštěm lze použít modifikovanou univerzální rovnici ztráty půdy MUSLE (Williams in Tipl, 2001). Faktor erozní účinnosti srážek R je nahrazen součinem objemu přímého odtoku a kulminačního průtoku a ostatní faktory představují hodnoty pro celé povodí. Rovnice má tvar

$$G = 11,8 \cdot (O_{pH} \cdot Q_{pH}) \cdot 0,56 K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P,$$

kde G je transport splavenin z přívalového deště závěrovým profilem (t) a O_{ph} je objem přímého odtoku [m^3] a Q_{pH} je velikost kulminačního průtoku [$m^3.s^{-1}$] a K , L , S , C , P jsou faktory USLE.

Ke kvantifikaci objemu plavenin ve vodních tocích se také používají matematické modely. Příkladem takových modelů jsou SWAT a AnnAGNPS, které umožňují i simulaci chodu plavenin v čase (Kliment a kol., 2008).

3. Metody a zdroje dat

Kapitola se věnuje metodám použitým v jednotlivých úsecích práce. Největší důraz je kladen na metody modelování erozních procesů včetně popisu postupu vyhotovení v prostředí GIS.

3.1. Hodnocení srážko-odtokových poměrů

Vyhodnocení srážkových a odtokových poměrů je provedeno na základě dat o denních srážkových úhrnech (2000 - 2009) a průměrných denních (2000 - 2009) a okamžitých (1991 - 2009) průtocích, která byla poskytnuta pozorovatelem. V případě poruchy srážkoměru, byla data doplněna údaji o plošném rozmístění srážek získanými radarovým pozorováním poskytnutými ČHMÚ. Základní statistické charakteristiky datových souborů jsou vyčísleny v denním, měsíčním, sezónním a ročním chodu.

Četnost mimořádných srážko-odtokových událostí je sledována za účelem nastavení automatického odebírání vzorků vody vzorkovačem. Jako mimořádná srážko-odtoková událost byla v případě povodí Černíčí definovaná taková událost, která vyvolá odtokovou výšku 20cm v měrném přelivu v závěru povodí. Za jednu událost je považováno i více překročení hranice 20 cm, pakliže se tak stane za dobu kratší než 6 hodin. V případě, že událost nastala na přelomu měsíce, je započtena do měsíce, ve kterém započala.

Ke zvýšení průtoků nad 20 cm dochází v důsledku tání sněhu nebo srážky vyššího úhrnu. Hodnocení příčiny srážek je provedeno na základě přiřazení dne s mimořádnou událostí k synoptické situaci podle Katalogu cirkulačních typů (www.chmi.cz) (Čekal, 2007). Synoptická situace je sledována v den mimořádné události D a ve tři předchozí dny D-1, D-2, D-3. V případě, že se synoptická situace během této doby neměnila, je považována za příčinnou DX. Když docházelo k přestavbě povětrnostní situace, je jako příčina mimořádné srážkové události považována ta, která nastala v den s nejvyšším srážkovým úhrnem DX. Nakonec je vyhodnocen podíl jednotlivých synoptických situací na četnosti mimořádných událostí.

Odtokové události ve vegetačním období jsou následně rozřazeny do několika typů na základě způsobu utváření extrémů (Čekal, 2007):

Typ A: Dochází k rychlému vzniku zvýšeného průtoku s ostrým vrcholem. Po dosažení kulminace dochází k pomalému mírnému poklesu odtokové vlny. Poté následuje rychlý pokles průtoků.

Typ B: Průtoková vlna se vyznačuje přítomností podružných vrcholů s pomalým poklesem průtoků. Během průtokové vlny dochází k dočasným ustálením průtoků na poklesové nebo vzestupné větvi.

Typ C: Vlna se vyznačuje výskytem i více podružných vrcholů a velkým objemem povrchového odtoku. Typické jsou pozvolný vzestup průtoků a významná doba trvání.

3.2. Hodnocení kvality vody a transportu plavenin

V roce 2008 byl v povodí instalován vzorkovač SIGMA 900 MAX (obr. 3.1) Přírodovědecké fakulty UK k odebrání vzorků vody za účelem analýzy vlastností látkového odnosu při mimořádných srážko-odtokových událostech.

Automatické spouštění je nastaveno tak, aby k odběrům docházelo po překročení výšky hladiny 25 cm v přelivu a poté při každé změně výšky hladiny o 5 cm. Vzorky jsou bezprostředně po události přepraveny do laboratoře k analýze. Vzorkovač je zapojen pouze během teplé části roku. V zimním období by mohlo dojít k zamrznutí vody v mechanismu a k poškození přístroje.

Naměřená data slouží k porovnání s hodnotami získanými pravidelným odebráním vzorků vody, která byla naměřena v období 22. 12. 2006 – 26. 2. 2010. Kvalita vody byla hodnocena na základě ČSN 757221. Charakteristické hodnoty, pomocí kterých je vodní tok zařazen do třídy jakosti vody, jsou vypočteny podle vzorce

$$C_p = (d_p \cdot C_k - 1) + (1 - d_p) \cdot C_k,$$

kde C_p je charakteristická hodnota se zvolenou mírou pravděpodobnosti p , C_k k-tá hodnota v sestupné řadě, d_p je pomocná proměnná, která se vypočte podle vzorce

$$d_p = k - 0,01 \cdot (100 - P) \cdot (n + 0,4) - 0,3,$$

kde $k = 0,01 \cdot (100 - P) \cdot (n + 0,4) + 0,3$ - výsledná hodnota zaokrouhlená nahoru a n počet prvků řady. Ukazatele, podle kterých bylo možné zařadit tok do třídy jakosti vod podle ČSN 757221, jsou spolu s mezními hodnotami uvedeny v tabulce 3.1.

Obrázek 3.1: Vzorkovač SIGMA 900 MAX

Zdroj: foto Z. Kulhavý (3. 6. 2008), Z. Kliment (12. 4. 2009)

Tabulka 3.1: Mezní hodnoty tříd jakosti vod

Název ukazatele	Jednotka	Třída jakosti vod				
		I	II	III	IV	V
Dusičnanový dusík	mg.l ⁻¹	< 3	< 6	< 10	< 13	≥ 13
Dusitanový dusík	mg.l ⁻¹	< 3	< 6	< 10	< 13	≥ 13
Amoniakální dusík	mg.l ⁻¹	< 0,3	< 0,7	< 2	< 4	≥ 4
Nerozpuštěné látky	mg.l ⁻¹	< 20	< 40	< 60	< 100	≥ 100
Chemická spotřeba kyslíku manganistanem	mg.l ⁻¹	< 6	< 9	< 14	< 20	≥ 20
Chemická spotřeba kyslíku dichromanem	mg.l ⁻¹	< 15	< 25	< 45	< 50	≥ 50
Fosforečnanový fosfor	mg.l ⁻¹	< 0,05	< 0,15	< 0,4	< 1	≥ 1
Celkový fosfor	mg.l ⁻¹	< 0,05	< 0,15	< 0,4	< 1	≥ 1
pH		6 – 8,5	6 - 8,5	6 – 8,5	5,5 – 9	< 5,5, > 9
Konduktivita	mS.m ⁻¹	< 40	< 70	< 110	< 160	≥ 160

Zdroj: ČSN 757221

Pro vybrané ukazatele je vyčíslen specifický látkový odnos L, který udává intenzitu odnosu z plochy povodí

$$L = C \cdot Q \cdot T \cdot A^{-1} [\text{mg.km}^{-2}],$$

kde C [mg . l⁻¹] je koncentrace daného ukazatele, Q [l. s⁻¹] průtok, T [s] čas a A [km²] plocha povodí.

3.3. Výpočet erozního ohrožení pomocí modelů

Pro výpočet erozního ohrožení byly vybrány modely USPED a WaTEM/ SEDEM. V obou modelech je výpočet ztráty půdy založen na modifikované rovnici USLE, proto pracují na podobném principu. Nejprve jsou na základě vstupních vrstev vytvořeny pravidelné čtvercové gridy jednotlivých erozních faktorů v rastrové podobě. V dalších

krocích probíhají mezi rastry matematické operace na základě algoritmů jednotlivých modelů.

3.3.1. Charakteristika modelu USPED

USPED (Unit Stream Power-Based Erosion/Deposition model) je model eroze a sedimentace založený na rovnici USLE. Je zaměřen na prostorové rozmístění oblastí s topografickým potenciálem pro vznik eroze a sedimentace. Model byl vyvinut v USA ve spolupráci odborníků z U. S. Army Construction Engineering Laboratories, Illinois Natural History Survey a Přírodovědecké fakulty Komenského Univerzity v Bratislavě. První výsledky byly získány aplikací modelů ve střední Illinois a Yakima Ridge, Washington v USA (Mitášová a kol., 1996; Mitáš, Mitášová, 1998).

Model USPED nevyžaduje zvláštní software, může být implementován v běžných prostředích GIS (ArcGIS, ArcView, GRASS GIS). Podle tohoto modelu hodnotu eroze, resp. akumulace ED vyjadřuje vztah:

$$ED = K_t [(grad\ h) \cdot s \cdot \sin\beta - h \cdot (k_p + k_t)],$$

kde K_t je koeficient transportu půdy, h hloubka sběrných ploch [m], s je jednotkový vektor ve směru nejstrmějšího svahu, β je úhel sklonu svahu [°], k_p je normálová křivost ve směru spádové křivky, k_t je normálová křivost ve směru tečny k vrstevnici.

V rámci vývoje modelu USPED nebyly zahrnuty faktory erozní účinnosti deště, ochranného vlivu vegetace a erodibility půd. Tyto faktory přebírá model USPED z rovnice USLE. Kapacita transportu sedimentů je vyjádřena vztahem:

$$T = R \cdot K \cdot C \cdot P \cdot A^m \cdot (\sin\beta)^n,$$

kde R , K , C , P jsou parametry rovnice USLE ($LS=A^m (\sin\beta)^n$), m a n jsou konstanty pro povrchový odtok vody způsobující erozi určené jako $m = 1,6$, $n = 1,3$ pro převládající rýhovou erozi a $m = n = 1$ pro převládající plošnou erozi. Na základě tohoto vztahu je možné erozi resp. akumulaci vyjádřit vztahem:

$$ED = \text{div}(T \cdot s) = d[(T \cdot (\cos\alpha) / dx] + d[T \cdot (\sin\alpha) / dy],$$

kde α je orientace svahu vůči světovým stranám. Poslední uvedená rovnice je rovná vztahům uvedeným dříve, ačkoli je její výpočet simplifikován. Kladné hodnoty ED určují místa s potenciálem pro akumulaci, záporné hodnoty ED určují místa s potenciálem pro erozi půdy (Mitášová a kol., 1996, Mitáš, Mitášová, 1998).

3.3.2. Postup zpracování modelu USPED

Model USPED může být zpracován v různých prostředích GIS. Postup vypracování se odvíjí od použitého prostředí GIS. V této práci je použit ArcMAP 9.3. Model USPED pracuje na krokovém postupu, kdy jsou vytvářeny vrstvy pravidelných čtvercových gridů. Vzniklé vrstvy poté vstupují do matematických operací. K výsledku vede následující postup, který byl upraven na základě *USPED model for erosion/ deposition (2010)*.

Před začátkem zpracování je třeba mít připraveny tyto vrstvy: vrstevnice, rozmístění faktorů K, C. R faktor uvažujeme na celé ploše povodí stejný (R=56). Rozlišení (resolution) 5 m. V programu ArcMAP 9.3 musí být aktivován nástroj Spatial Analyst. Zpracování modelu je provedeno v následujících krocích:

- 1) Pomocí nástroje *Spatial Analyst Tools – Topo to raster* vytvořím digitální model terénu s rozlišením 5 m. Vzniklý rastr nazvu **dem_5**.
- 2) Pomocí nástroje *Spatial Analyst Tools – Polygon to raster* vytvořím rastrové vrstvy K a C faktoru. Každému čtverci je přiřazena hodnota K a C faktoru, který na ploše čtverce 5x5 m převládá. Vzniklé vrstvy analogicky nazvu **kfac** a **cfac**.
- 3) Pomocí nástroje *Spatial Analyst Tools - Surface – Slope* vyhodnotím na základě digitálního modelu území sklonitost povodí ve stejném rozlišení. Hodnoty sklonitosti výsledné mapy musí být ve stupních. Vzniklou rastrovou vrstvu nazvu **slope**.
- 4) Pomocí nástroje *Spatial Analyst Tools – Surface – Aspect* vyhodnotím na základě digitálního modelu území orientaci území vůči světovým stranám ve stejném rozlišení. Hodnoty orientace svahů výsledné mapy musí být ve stupních. Vzniklou vrstvu nazvu **aspect**.
- 5) Pomocí nástroje *Spatial Analyst Tools – Map Algebra – Single Output Map Algebra* vypočtu sběrné plochy pomocí funkce Flowaccumulation. Hodnota pixelu výsledné vrstvy odpovídá počtu pixelů – čtverců, ze kterých se do daného pixelu – čtverce soustředí odtok. Do dialogového okna *Map Algebra* napíšu pokyn:

FlowAccumulation(FlowDirection([dem_5]))

a vyhodnotím stiskem Evaluate. Vzniklou rastrovou vrstvu nazvu **flowacc**.

- 6) Pro výpočet LS faktoru při převládající rýhové eroze použiji nástroj opět *Map Algebra*. Do dialogového okna zadám nejprve

*Pow([flowacc] * resolution , 1.6),*

vyhodnotíme stiskem Evaluate, vzniklou vrstvu nazveme **cast1**. Postup opakujeme pro pokyn

$Pow(\sin([slope] * 0.01745), 1.3)$). Pomocí nástroje *Map Algebra* obě vrstvy vynásobíme, do dialogového okna zadám pokyn

$[cast1] * [cast2]$,

vyhodnotím stiskem Evaluate. Vzniklou vrstvu nazvu **sflowtopo**.

7) Pomocí nástroje *Map Algebra* vypočítám transportní kapacitu, do dialogového okna zadám vzorec:

$[sflowtopo] * [kfac] * [cfac] * 56 * \cos((([aspect] * (-1)) + 450) * 0.01745)$,

vyhodnotím stiskem Evaluate. Vzniklou vrstvu nazvu **qsx**.

Do dialogového okna zadám vzorec:

$[sflowtopo] * [kfac] * [cfac] * 56 * \sin((([aspect] * (-1)) + 450) * 0.01745)$,

vyhodnotím stiskem Evaluate. Vzniklou vrstvu nazvu **qsy**.

8) Pomocí nástroje *Spatial Analyst Tools – Surface – Slope* a *Spatial Analyst Tools – Surface – Aspect* vypočtu sklonitost a orientaci vůči světovým stranám vrstev qsx a qsy. Vzniklé vrstvy pojmenuji analogicky **qsx_slope**, **qsy_slope**, **qsx_aspect** a **qsy_aspect**.

9) Pomocí nástroje *Map Algebra* provedu derivaci vrstev qsx a qsy. Do dialogového okna vložíme nejprve vzorec:

$\cos((([qsx_aspect] * (-1)) + 450) * 0.01745) * \tan([qsx_slope] * 0.01745)$,

vyhodnotíme stiskem Evaluate. Vzniklou vrstvu nazveme **qsx_dx**.

Dále do dialogového okna vložíme vzorec

$\sin((([qsy_aspect] * (-1)) + 450) * 0.01745) * \tan([qsy_slope] * 0.01745)$

vyhodnotíme stiskem Evaluate. Vzniklou vrstvu nazveme **qsy_dy**.

10) Pomocí nástroje *Map Algebra* provedeme výsledný výpočet. Pro převládající rýhovou erozi vložíme do dialogového okna vzorec

$[qsx_dx] + [qsy_dy]$

vyhodnotím stiskem Evaluate. Vzniklou vrstvu nazvu **erdep**.

Vrstva erdep je výsledkem modelu USPED. Kladné hodnoty ukazují lokality, kde dochází k akumulaci erodovaného materiálu, záporné hodnoty naznačují lokality s erozí půdy.

Program ArcMAP 9.3 má potíže při zobrazování hodnot v intervalu $<-1, 1>$. Tomuto problému se dá předem zabránit tím, že se již vstupní vrstva K faktoru vynásobí 100 a C faktoru 1000. Nedoporučuje se na konci výsledek dělit 100 000, avšak tento fakt se nesmí opomenout při interpretaci výsledků.

3.3.3. Charakteristika modelu WaTEM/ SEDEM

WaTEM/ SEDEM (Van Rompaey a kol., 2001; Van Oost a kol., 2000, Verstraeten a kol., 2002) je empirický model eroze a transportu sedimentů. Tento volně dostupný model byl vyvinut na katedře Fyzické a regionální geografie Katolické univerzity v Lovani v Belgii. Je spojením dvou modelů: WaTEM (Water and Tillage Erosion Model) a SEDEM (Sediment Delivery Model), které byly vyvinuty na stejném výzkumném pracovišti za finanční podpory Územního odboru Ministerstva pro Flandry. Výsledkem poslední revize, která proběhla v roce 2005, je verze WaTEM/ SEDEM 2.1.0, která je použita v této práci.

WaTEM/ SEDEM se vyznačuje snadno čitelným uživatelským rozhraním. Model byl zkonstruován za účelem hodnocení vlivu zemědělského hospodaření na krajinu a posuzování účinnosti protierozních opatření. Používá se při odhadu ztráty půdy vodní erozí, označení míst potenciálně ohrožených vodní erozí a simulování vlivů různých krajinných scénářů na erozi. Pomocí modelu lze předpovídat i sedimentaci erodovaných půdních částic. Výsledky by měly napomoci při plánování efektivních protierozních opatření a při určování vhodných osevních postupů na jednotlivých pozemcích (Van Rompaey a kol., 2001; Van Oost a kol., 2000, Verstraeten a kol., 2002).

Na rozdíl od složitějších dynamických modelů se WaTEM/ SEDEM zaměřuje na prostorovou a méně na časovou variabilitu erozních faktorů. K vypočtení průměrné roční ztráty půdy používá model WaTEM/ SEDEM aplikovanou rovnici RUSLE. Vlastnosti povrchového odtoku jsou počítány na základě algoritmu, který uvažuje velikost pozemků, směr orby a přítomnost cest. WaTEM/ SEDEM nepředpovídá sedimentaci ve vodním toku, v říční nivě nebo břehovou erozi. Tyto skutečnosti je nutné zohlednit při interpretaci výsledků (Van Rompaey a kol., 2001; Van Oost a kol., 2000, Verstraeten a kol., 2002).

V modelu WaTEM/ SEDEM je povodí rozděleno na čtvercovou síť. Vstupy do modelu tvoří průměrné roční hodnoty jednotlivých faktorů. Pracuje se soubory ve formátu softwaru Idrisi32. Nejprve model spočítá dlouhodobou průměrnou roční ztrátu vodní erozí na základě rovnice:

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P,$$

kde E je dlouhodobá průměrná roční ztráta vodní erozí [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$], R je faktor erozní účinnosti deště [$\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$], K je faktor erodibility půd

[kg. h. MJ⁻¹. mm⁻¹], LS je faktor délky a sklonu svahu, C je faktor ochranného vlivu vegetace, P je faktor protierozních opatření (L , S , C , P jsou bezrozměrné koeficienty).

Transportní kapacita jednotlivých elementů DEM je vztažena k potenciálu rýhové eroze v daném bodě podle vztahu:

$$TC = kTc \cdot E_{PR},$$

kde TC je transportní kapacita [kg.m⁻¹.rok⁻¹], kTc koeficient transportní kapacity [m], E_{PR} potenciál náchylnosti půdy k rýhové erozi [kg.m⁻².rok⁻¹].

Celková potenciální eroze je teoretická hodnota ztráty půdy z holé půdy a je dána součtem eroze rýhové a plošné. Potenciál rýhové eroze je určen jako

$$E_{PR} = E_{PT} - E_{PIR},$$

kde E_{PT} je potenciální rýhová eroze [kg.m⁻².rok⁻¹] a E_{PIR} je potenciální plošná eroze [kg.m⁻².rok⁻¹].

E_{PT} a E_{PIR} jsou dány vztahy

$$E_{PT} = R \cdot K \cdot L \cdot S,$$

$$E_{PIR} = a \cdot R \cdot K_{IR} \cdot S_{IR},$$

kde R , K , L , S jsou faktory USLE, a koeficient, jehož hodnota musí být doplněna měřením, K_{IR} K faktor pro plošnou erozi (shodný s K faktorem pro celkovou erozi) a S_{IR} faktor sklonu svahu pro plošnou erozi.

Z uvedených rovnic vyplývá výsledný vztah pro transportní kapacitu

$$TC = kTc \cdot R \cdot K \cdot (L \cdot S - a S_{IR}) \text{ (Van Rompaey in Krása, 2004).}$$

Koeficient transportní kapacity udává množství sedimentu, které může být transportováno dále po svahu. Toto množství je rovno množství sedimentu, které by vzniklo na obnaženém půdním povrchu. Čím vyšší je koeficient transportní kapacity, tím více sedimentů je dopraveno na úpatí svahů. Pro každé využití půdy je hodnota koeficientu transportní kapacity odlišná. Pokud součet produkované eroze a vstupujícího sedimentu ze sousedních buněk převyšuje transportní kapacitu, dochází k buňce k sedimentaci (Verstraeten, 2006).

3.3.4. Postup zpracování modelu WaTEM/ SEDEM

Výsledek modelu je výrazně ovlivněn kvalitou vstupních dat. Řešené území musí tvořit uzavřené povodí. Model WaTEM/ SEDEM vyžaduje několik vstupních vrstev vytvořených v prostředí GIS (Van Rompaey a kol., 2001) a převedených do formátu Idrisi32 (*.rst). Všechny vrstvy musí pokrývat území o stejné velikosti, musí být

vyhotoveny ve stejném geografickém systému, musí mít stejné rozlišení a být označeny identifikátory (viz. postup). Pro vypracování byla použita verze programu WaTEM/ SEDEM 2.1.0, který je volně dostupný na internetových stránkách vývojového týmu programu. Pro správné fungování modelu je nutné nejdříve nahrát soubor watemsedem.ini do složky C:\\WINDOWS (v operačním systému Windows XP).

V prvním dialogovém okně Input1 (obrázek 3. 3) se zadává:

1) **DEM** – digitální model území, ze kterého jsou odstraněna bezodtoká území. DEM slouží k výpočtu LS faktoru.

2) **Parcel map** (mapa pozemků) – reklasifikovaná mapa využití území rozlišující tyto kategorie: ornou půdu, les, trvalé travní porosty, cesty a intravilán a vodní toky. Každá z těchto kategorií musí nést vlastní identifikátor:

-2 cesty a intravilán,

-1 vodní toky,

0 oblast mimo sledované území,

1 - n orná půda – pole, maximální číslo udává počet polí (tato hodnota by měla být menší než 10 000),

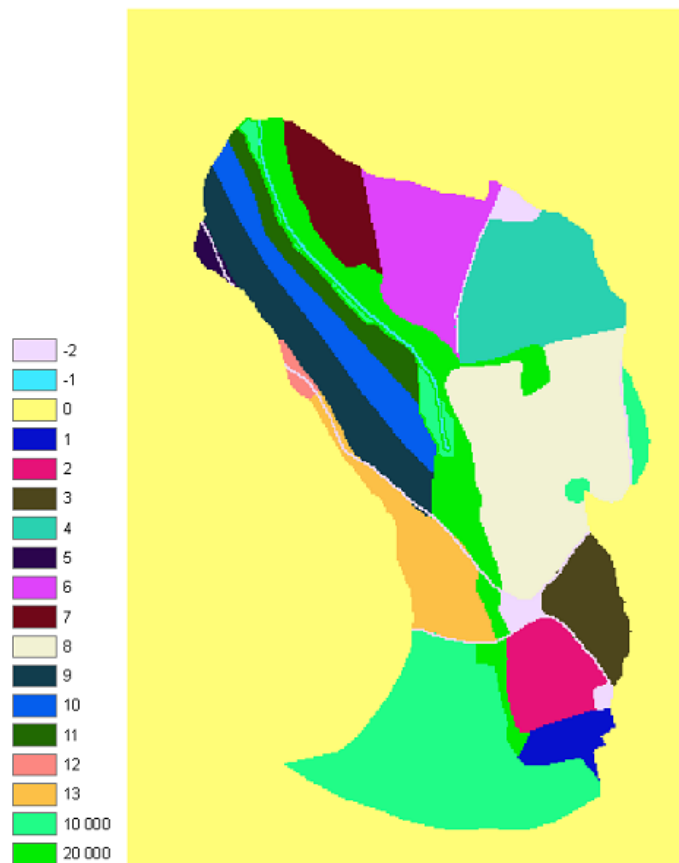
10 000 les,

20 000 trvalé travní porosty.

Jednotlivé parcely nesou vlastní identifikátor proto, aby mohly být stanoveny jejich hranice jako překážky povrchového odtoku, odtokové linie a místa sedimentace. Vrstvu parcel lze sestavit v programu ArcMap, nebo vytvořit pomocí nástroje Eromat přímo v programu WaTEM/ SEDEM 2.1.0 vložením dílčích vrstev. Vrstva Parcel map, která vstupuje do modelu WaTEM/ SEDEM je ukázána na obrázku 3.2.

3) **River routing** (vodní toky) – tato vstupní vrstva není povinná. Pakliže není zadána do vstupu, model zachází se všemi vodními toky jako s jednou jednotkou, to znamená, že všechny půdní částice, které dosáhnou vodního toku, jsou sečteny.

Řešené zájmové území má pouze jeden stálý vodní tok, což značně usnadňuje přípravu této vstupní vrstvy. V případě většího množství vodních toků nebo přítomnosti vodních nádrží je třeba vytvářet vektorovou topologii vodních toků pomocí nástroje programu WaTEM/ SEDEM Eromat River Routing (Krása, 2004).

Obrázek 3.2: Vstupní vrstva Parcel map do modelu WaTEM/ SEDEM

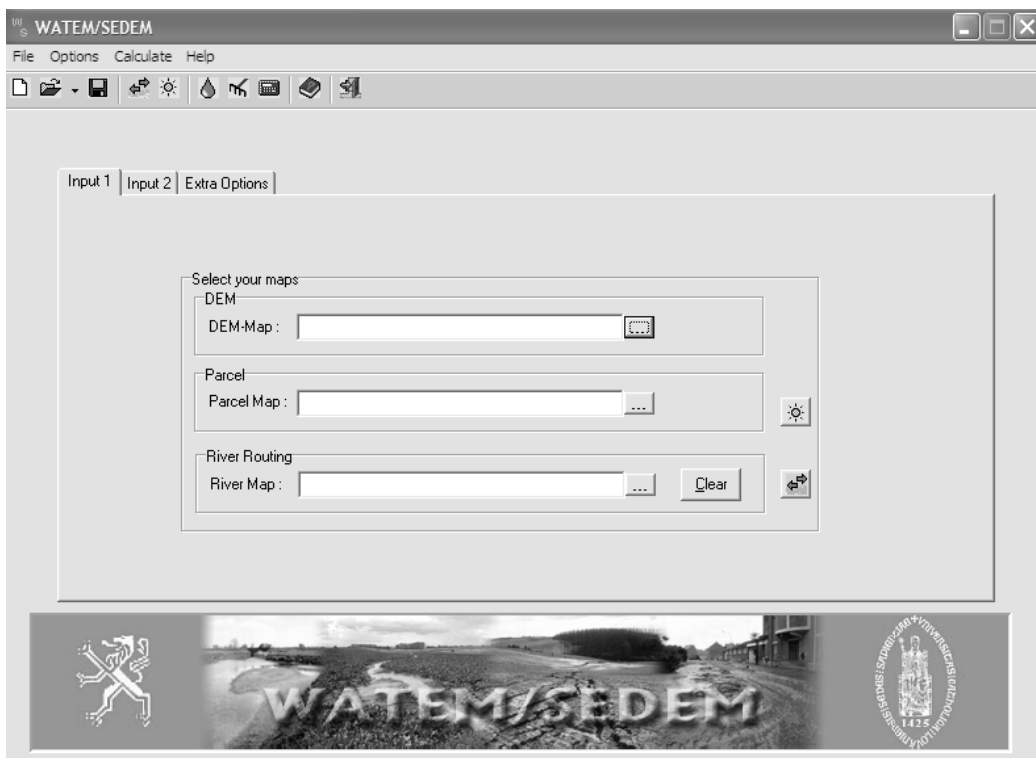
Zdroj: odvozeno na základě dat VÚMOP

V druhém dialogovém okně Input2 (obrázek 3.4) vstupují do modelu tyto vrstvy:

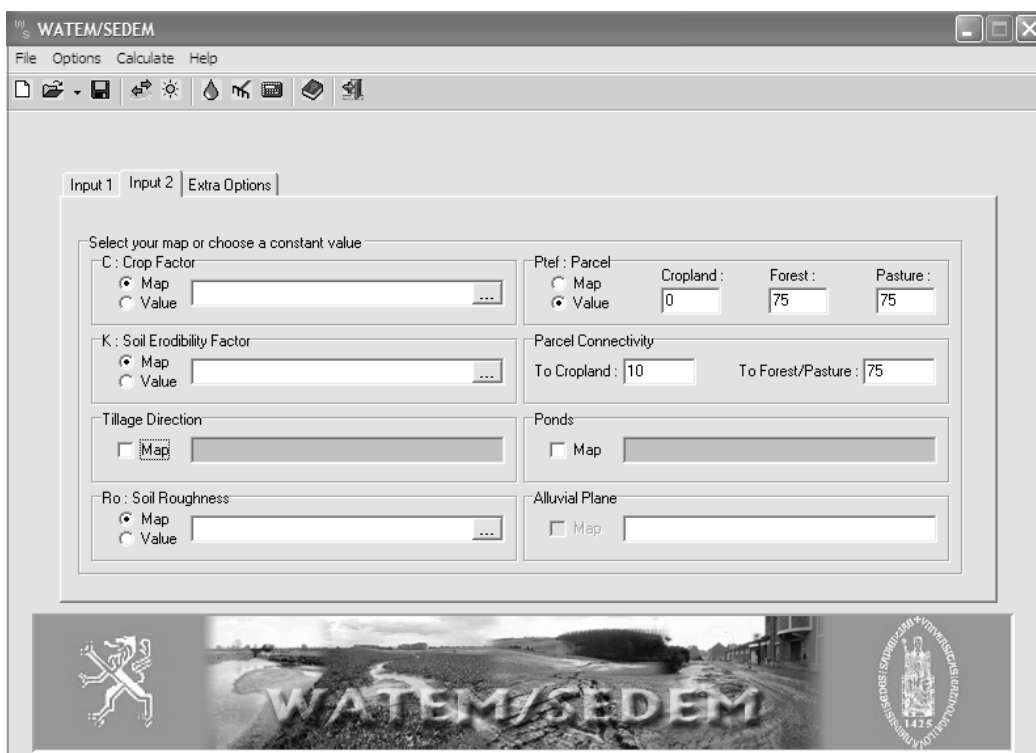
4) **K: Soil erodibility factor** (faktor erodibility půd) - K faktor rovnice RUSLE vyjádřený v $\text{kg.m}^{-2}.\text{h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ (odpovídá stonásobku běžně používaných hodnot). Do modelu lze zadat buď mapu rozmístění K faktoru ve formátu Idrisi32, nebo pouze jednu hodnotu K faktoru s tím, že je pro celé území stejná.

5) **C: Crop factor** (faktor ochranného vlivu vegetace C) - rozložení faktoru C v povodí. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která dosahuje hodnot od 0 (žádná eroze) do 1 (maximální eroze). Do modelu lze zadat samostatnou mapu faktoru C pro celé území ve formátu Idrisi32 nebo zajistit průměrnou hodnotu C faktoru pro hlavní skupiny půd se stejným využitím, tj. pro zemědělskou půdu, lesy a pastviny.

6) **Ponds** (vodní nádrže) – vrstva určuje polohu vodních nádrží v povodí. Každá nádrž musí být opatřena identifikátorem určujícím zachytnou schopnost nádrže v % (podíl sedimentů, které se usadí v nádrži). Na řešeném území se vodní nádrže nevyskytují, do modelu se tedy tato vrstva nezadá.

Obrázek 3.3: Dialogové okno Input1 programu WaTEM/ SEDEM 2.1.0.

Zdroj: Van Rompaey a kol. (2001), Van Oost a kol. (2000), Verstraeten a kol. (2002)

Obrázek 3.4: Dialogové okno Input2 programu WaTEM/ SEDEM 2.1.0.

Zdroj: Van Rompaey a kol. (2001), Van Oost a kol. (2000), Verstraeten a kol. (2002)

7) **Ptef parcel (parcel trap efficiency** - poměr zachycení sedimentu jednotlivých typů pozemků) - může být vložen v podobě rastrové mapy na základě vlastního odvození terénním měřením, nebo lze zadat hodnoty získané kalibrací autorů modelu. Van Rompaey in Krása (2004) doporučuje hodnoty Ptef orná půda = 0 a Ptef TTP a les = 75. Hodnoty jsou v programu přednastaveny.

8) **Parcel Connectivity** (propustnost hranic pozemků určuje poměr zachycení odtoku na hranicích pozemků). Zadanou hodnotou je redukována celková zdrojová plocha elementu při vstupu na pozemek při překročení hranice pozemku. Udává se v %. Van Rompaey in Krása (2004) doporučuje hodnoty Parcel Connectivity pro vstup na ornou půdu = 10 a na TTP a les = 75. Tyto hodnoty vycházejí z testování modelu v belgických podmínkách a měly by být kalibrovány pro ČR.

V třetím dialogovém okně Extra Options (obr. 3.5) je třeba zadat následující údaje:

9) **LS** (faktor délky a sklonu svahů) – LS faktor rovnice RUSLE. Program nabízí čtyři možnosti výpočtu LS faktoru:

- a) podle Wishmeier a Smith (1978),
- b) podle McCool (1987, 1989),
- c) podle Govers (1991),
- d) podle Nearing (1997).

Dále program nabízí dvě možnosti výpočtu charakteristiky exponentů délky svahu m:

- a) podle Wishmeier a Smith (1978)
- b) podle Mc Cool (1987, 1989), kde se m rovná pro erozi plošnou i rýhovou.

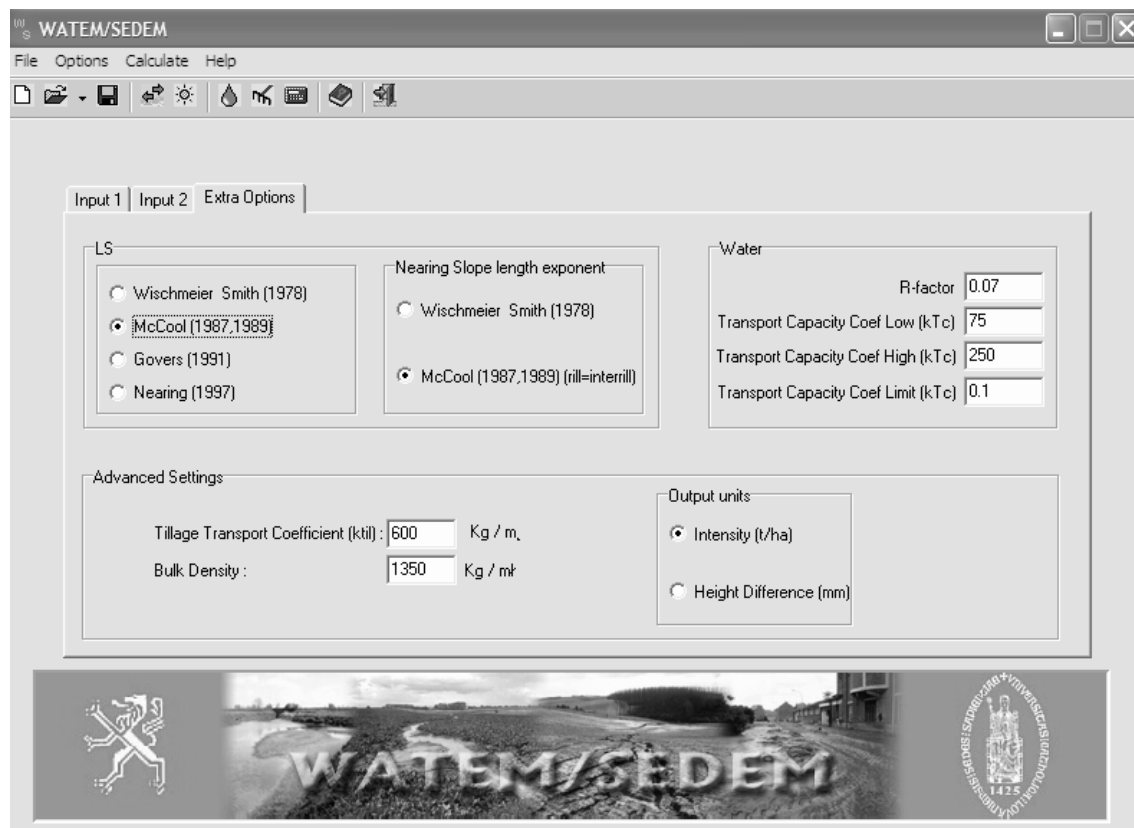
Uvedené možnosti využívají k výpočtu faktorů LS ze zdrojových ploch stejných algoritmů jako program USLE2D. Van Rompaey (2001) doporučuje počítat LS faktor podle b) McCool (1987, 1989) a výpočet charakteristiky délky svahu m podle McCool (1987, 1989).

10) **Water** (faktor erozní účinnosti srážek) – R faktor rovnice USLE. Lze zadat jednu hodnotu faktoru R, která je považována na celém území za stejnou. R faktor je zde udáván v MJ. mm. m⁻².h⁻¹, což odpovídá 1/1000 jednotek používaných v ČR.

11) **Transport Capacity Coef** (koeficient transportní kapacity) kTc – model vyžaduje dvě hodnoty kTc. kTc low určuje hodnotu kTc pro neerodivní plochy, kTc high pro erodivní plochy. Podle Van Rompaey (2001) byl odvozen kTc low = 100 a kTc high = 200. Hodnota kTc limit odpovídá hodnotě C faktoru, která odlišuje erodivní a neerodivní plochy. Pro hodnoty nižší než kTc low program počítá s hodnotou kTc low, pro vyšší naopak s hodnotou kTc high.

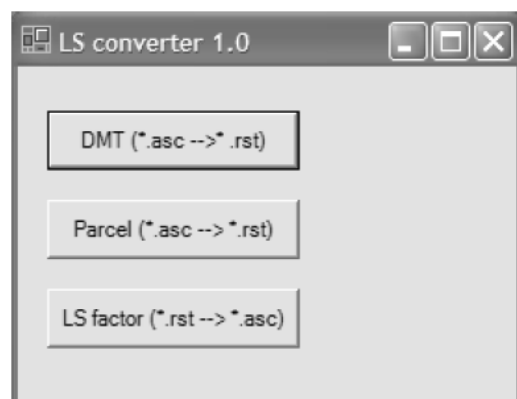
12) **Output units** (jednotky výstupu modelu) – program nabízí volbu mezi výstupem v $\text{t.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ a ve výškovém rozdílu půdy způsobeném erozí mm.rok^{-1} .

Obrázek 3.5: Dialogové okno Extra Options programu WaTEM/ SEDEM 2.1.0.



Zdroj: Van Rompaey a kol. (2001), Van Oost a kol. (2000), Verstraeten a kol. (2002)

Obrázek 3.6: Uživatelské rozhraní programu LS-converter



Zdroj: <http://www.plaveniny.cz/cz/rusle>, 1. 3. 2010

Poznámka k vytváření souborů formátu Idrisi32

Model WaTEM/ SEDEM vyžaduje vstupy ve formátu Idrisi32. Protože zdrojová data jsou ve formátu shapefile *.shp, je potřeba provést převod souborů do formátu Idrisi32 *.rst. Převod probíhá ve dvou krocích. Nejprve se převede soubor *.shp pomocí nástroje *ArcTools – Conversion Tools – Polygon to Raster* do formátu *.img, který se dále převede pomocí nástroje *ArcTools – Conversion Tools – Raster to ASCII* do formátu ASCII grid *.asc. Soubor ve formátu ASCII grid *.asc lze převést pomocí programu LS-converter do formátu Idrisi32 *.rst. Program LS-converter má dobře čitelné uživatelské rozhraní (obr. 3.6) a je volně dostupný na <http://www.plaveniny.cz/cz/rusle/> (Kadlec, 2007). V souboru *.asc musí být vždy použita tečka jako desetinný oddělovač. Při převodu souborů *.img na *.asc může dojít vinou softwaru k zaokrouhlení čísel v intervalu (0 – 1) na nulové hodnoty, což zabraňuje vytvoření správné vrstvy C faktoru. Tomuto problému lze předejít vynásobením vrstev C a K faktoru v prostředí ArcGIS. Do modelu WaTEM/ SEDEM se poté zadá výsledná vrstva CxK do pole K faktoru a do polí C faktoru se vepíše shodně hodnoty 1.

3.3.5. Rozbor jednotlivých erozních faktorů

Faktor erozní účinnosti srážek

Faktor erozní účinnosti deště R závisí na četnosti výskytu srážek, jejich kinetické energii, intenzitě a úhrnu. Stanovením R faktoru pro území ČR se zabýval Janeček a kol. (1992) a Dostál a kol. (2006). Vzhledem k velikosti území lze považovat hodnotu R faktoru pro celé povodí za homogenní.

Janeček a kol. (1992) určil jako průměrnou hodnotu R faktoru pro ČR $20 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$. Pro nedalekou stanici Čechtice určil faktor $R = 21,9 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$, kde vycházel z doby pozorování 21 let. Do výpočtu zahrnul deště o vydatnosti vyšší nebo rovné 10 mm a intenzitě vyšší nebo rovné $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Tato průměrná hodnota je vztažena k vegetačnímu období. Podle Janečka (2006) lze však na základě nově zpracovaných ombrografických záznamů předpokládat, že hodnota R faktoru je vyšší. Jako průměrnou hodnotu pro ČR doporučuje používat hodnotu $R = 45$, resp. $66 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$.

Revizi R faktoru provedl Dostál a kol. (2006a) z Katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství ČVUT v Praze. Výsledek vychází z údajů 87 srážkoměrných stanic, kde byla hodnota R faktoru odvozena na základě modifikovaného Fournierova indexu a dlouhodobých měsíčních úhrnů srážek v letech 1962 - 2001 a kalibrována na základě čtyř stanic, kde byla dodržena původní metodika W. H. Wischmeiera a D. D. Smitha a DEM. Podle Dostála a kol. (2006a) je hodnota R faktoru pro povodí Černíčí $56 \text{ MJ.ha}^{-1}.\text{cm.h}^{-1}$.

Dostál a kol. (2006b) také provedl výpočet R faktoru pro 37 srážkoměrných stanic v ČR podle metodiky W. H. Wischmeiera a D. D. Smitha pro období 2000-2005. Byly uvažovány srážky s maximální intenzitou alespoň 24 mm.h^{-1} a celkovým úhrnem alespoň 12,5 mm, oddělených od okolních srážek minimálně šestihodinovou pauzou. Z výsledné mapy lze pro Černíčí odečíst hodnotu $R = 74 \text{ MJ.ha}^{-1}.\text{cm.h}^{-1}$.

Při modelování bude v obou modelech použita hodnota $R = 56 \text{ MJ.ha}^{-1}.\text{cm.h}^{-1}$. Hodnota $R = 21 \text{ MJ.ha}^{-1}.\text{cm.h}^{-1}$ (Janeček a kol., 1992) se jeví jako nepravděpodobně nízká a hodnotu $R = 74 \text{ MJ.ha}^{-1}.\text{cm.h}^{-1}$ (Dostál a kol., 2006b) nelze považovat vzhledem k délce vyhodnocovaného období za reprezentativní.

Faktor erodibility půd

Erodibilita půdy je dána soudržností půdních částic a vlastnostmi ovlivňujícími infiltrační schopnost půd. S rostoucí soudržností půdy roste množství energie nutné k uvolnění půdních částic a jejich uvedení do pohybu. Čím vyšší je infiltrační schopnost půdy, tím menší je povrchový odtok a transport půdních částic. Při zrychlené vodní erozi dochází k odplavení povrchové vrstvy půdy, která pak není schopna ztrátu nahradit ani v dlouhodobém časovém měřítku (Šarapatka, Dlapa, Bedrna, 2002).

V rovnici USLE je K faktor definován jako odnos půdy (v t.ha^{-1}) na jednotku dešťového faktoru R ze standardního pozemku o délce 22,13 m na svahu o sklonu 9 %, který je udržován jako kypřený černý úhor kultivací ve směru sklonu. K faktor odvozený pro území ČR vychází z půdních vlastností, kterými jsou zrnitost, obsah humusu, kvalita půdní struktury a propustnost půdy. (Janeček a kol., 1992).

V povodí Černíčí je nejvíce zastoupen půdní typ kambizem modální, která patří podle Vopavila (2006) ke středně erozně ohroženým půdám. Hydromorfní půdy a gleje mají vysokou hodnotu K faktoru, jejich faktická erozní ohroženost bývá však díky trvalému

zamokření nižší. Tyto půdy jsou částečně využívány jako TTP, což také jejich erozní ohroženost snižuje.

Základem pro odvození K faktoru byla digitální půdní mapa BPEJ, která byla vytvořena na základě výsledků komplexního průzkumu zemědělských půd v 60. - 70. letech 20. století. K určení K faktoru byl použit převodní vztah podle Janečka a kol. (2007) na základě HPJ. Hodnoty K faktoru v povodí udává tabulka 3.2.

Tabulka 3.2: K faktor HPJ vyskytujících se v povodí Černíči

HPJ	Hodnota faktoru K	Plocha povodí (%)
29	0,32	64,7
47	0,43	7,3
50	0,33	3,2
68	0,49	7,3
Nebonitováno (lesní půda)	0	17,6

Zdroj: VÚMOP (2009), Janeček a kol. (2007)

Topografický faktor LS

Faktor délky a sklonu svahu je vyjádřen topografickým faktorem LS. Topografický faktor se určuje pro reprezentativní dráhy plošného povrchového odtoku, které charakterizují odtokové poměry na pozemku. Intenzita eroze se zvyšuje s rostoucí délkou svahu.

Délka svahu se určuje jako horizontální vzdálenost od místa vzniku povrchového odtoku k bodu, kde se sklon svahu snižuje natolik, že dochází k ukládání erodovaného materiálu, nebo se plošný odtok soustředí do odtokové dráhy. Hodnota faktoru L je závislá na neporušené délce svahu a na exponentu délky svahu m , který vyjadřuje náchylnost svahu vůči tvorbě rýhové eroze. Nízké hodnoty dosahuje exponent m na plochách s nízkým poměrem rýhové eroze k plošné, tj. na pastvinách a jiných ulehých půdách s vegetačním pokryvem. Středních hodnot nabývá na pozemcích s řádkovými plodinami a na středně ulehých půdách s řídkým nebo středním pokryvem. Vysoké hodnoty poměru rýhové a plošné eroze se vyskytují na nově vytvořených antropogenních půdách a na velmi zkypřených půdách (Janeček a kol., 2007). Vzhledem k zemědělské povaze sledovaného povodí lze usoudit, že rýhová eroze převládá nad plošnou.

Faktor S narůstá s rostoucím sklonem svahu. Hodnoty faktoru S pro přímý svah jsou uvedeny v tabulce 3.4.

Tabulka 3.3: Hodnoty faktoru L pro $m=0,5$

Délka svahu (m)	Hodnota faktoru L
20	0,68
50	1,52
100	2,13
150	2,61

Zdroj: Janeček a kol. (2007)

Tabulka 3.4: Hodnoty faktoru S

Sklon svahu	Hodnota faktoru S
1°	0,246
4°30′	1,172
9°	2,795
13°30′	4,327

Zdroj: Janeček a kol. (2007)

Na hodnotu faktoru L má vliv přítomnost překážek odtoku na svahu, tzn. meze, cesty, zatravněné pásy, hranice pozemků apod. Do modelu WaTEM/ SEDEM je potřeba vložit vrstvu parcel vytvořenou na základě vyhodnocení překážek odtoku v povodí. Model USPED s překážkami v odtoku nepočítá. Faktor LS počítá model WaTEM/ SEDEM automaticky na základě DEM a vrstvy parcel. Model USPED vyčíslí faktor LS automaticky na základě DEM.

Faktor ochranného vlivu vegetace C

Erozní procesy jsou významně ovlivněny využitím krajiny. Vegetační kryt ovlivňuje erozi více způsoby: přímo chrání půdu před destruktivním dopadem dešťových kapek a zpomaluje rychlost povrchového odtoku, nepřímo pak působením vegetace na půdní vlastnosti jako propustnost a pórovitost, omezuje zanášení pórů rozplavenými půdními částicemi, zajišťuje mechanické zpevnění půdy kořenovým systémem, zvyšuje vodní kapacitu půdy, podporuje biologickou aktivitu půd. Ochranný vliv je časově proměnný a je přímo úměrný pokryvnosti a hustotě porostu v době přívalového deště. Nejnáchylnější je zemědělská půda především v jarním období, kdy ještě není dostatečně chráněna vegetačním krytem. Největší ochrannou účinnost vykazují kvalitní lesní a travnaté porosty. Naopak nejméně odolná je orná půda (Janeček a kol., 2002).

Hodnocení míry erozního ohrožení je v případě zemědělských půd komplikované, protože zde dochází k častému střídání kultur, osevních postupů, způsobu agrotechnických prací atp. V rámci zemědělských půd lze jako nejúčinnější označit porosty trav a jetelovin, zatímco širokořádkové plodiny (kukuřice, okopaniny, sady a vinice) chrání půdu nedostatečně (Kliment, Langhammer, 2005).

Za účelem hodnocení faktoru C byla použita databáze pěstovaných plodin v Černíči v letech 1990-2009. Do modelů vstupují průměrné roční hodnoty faktoru C pro jednotlivé zemědělské plodiny. Hodnoty C faktoru pro zemědělské plodiny byly převzaty podle Krásky (2004), pro TTP a lesy byla převzata z práce Kliment, Langhammer (2005). Hodnoty C faktoru pro plodiny, které se v povodí vyskytly, uvádí tabulka 3.5.

Tabulka 3.5: Hodnoty C faktoru pro plodiny, které se vyskytly v Černíči (1991 – 2009)

Plodina	Hodnota C faktoru
Pšenice ozimá	0,12
Žito	0,17
Ječmen jarní	0,15
Ječmen ozimý	0,17
Oves	0,10
Kukuřice na siláž	0,72
Brambory rané	0,6
Brambory pozdní	0,44
Řepka	0,22
Mák	0,5
Len	0,25
Pícniny jednoleté	0,02
Pícniny víceleté	0,01
Lesy, TTP	0,005

Zdroj: Kráska (2004), Kliment, Langhammer (2005)

Faktor protierozních opatření

V povodí Černíči nebyla aplikována žádná protierozní opatření. Faktor protierozních opatření P bude ve výpočtu erozní ohroženosti zanedbán, tedy $P = 1$.

3.4. Mapové a datové zdroje

Pro zpracování práce jsou použity tyto mapové a datové zdroje:

- Databáze denních srážkových úhrnů a průměrných průtoků pro stanici Černíči (2000-2009). Zpracoval VÚMOP, Praha.

- Digitální prostorová data Černíči (vrstevnice, DEM, hony, odvodnění). VÚMOP, Praha.
- Jakost vody na profilu Černíči. VÚMOP, Praha 2010.
- Katalog cirkulačních typů ČR. ČHMÚ. Dostupné online www.chmi.cz, přístup 15. 3. 2009.
- KLETEČKA, F. (2009): Databáze pěstovaných plodin ZD Čechtice 1991-2009.
- Plošné odhady srážek z radaru (archiv 2004-2009). Nepublikováno. ČHMÚ 2009.
- PRAŽÁK, P. (2010): Databáze pěstovaných plodin v Černíči 1990-2009.
- ArcData ČR. 2009.
- Císařské otisky stabilního katastru z roku 1850. 1:2000. Listy Czernitchy a Krziwsaudow (poskytnuto prostřednictvím ČÚZK).
- Digitální mapa BPEJ 1:5000, výřez pro povodí Černíči, zpracoval VÚMOP, Praha 2009.
- Digitální mapa honů a využití území, zpracoval VÚMOP, Praha.
- Digitální model území 5, výřez pro povodí Černíči, na základě geodetických měření zpracoval VÚMOP, Praha.
- Digitální ortofoto ČR. Geodis Brno, 2002-2003 a 2003-2008. Dostupné na www.mapy.cz, přístup 1. 2. 2010.
- Geologická mapa ČR 1:50 000. Dostupná na <http://mapy.geology.cz>, přístup 1. 2. 2010.
- Kartogram zrnitosti, skeletovitosti a zamokření. Okres Benešov. 1:10000. Expediční skupina pro průzkum půd Praha. Praha, 1972.
- Mapa Generálního štábu čs. armády, list č. M-33-91-A-a 1:25 000, 1955.
- Mapa Generálního štábu čs. armády, list č. M-33-91-A-a 1:25 000, 1985.
- Ortofoto České republiky 1:5 000. Listy PACO00, PACO01, PACO10, PACO11. ČÚZK (2006-2008).
- Půdní mapa ČR 1:50 000, list 23-12 Ledeč nad Sázavou. Český geologický ústav. Praha 1996.
- Topografická mapa ČSR. Měřítko 1: 25000. Listy 4154-3, 4154-4. 1920.

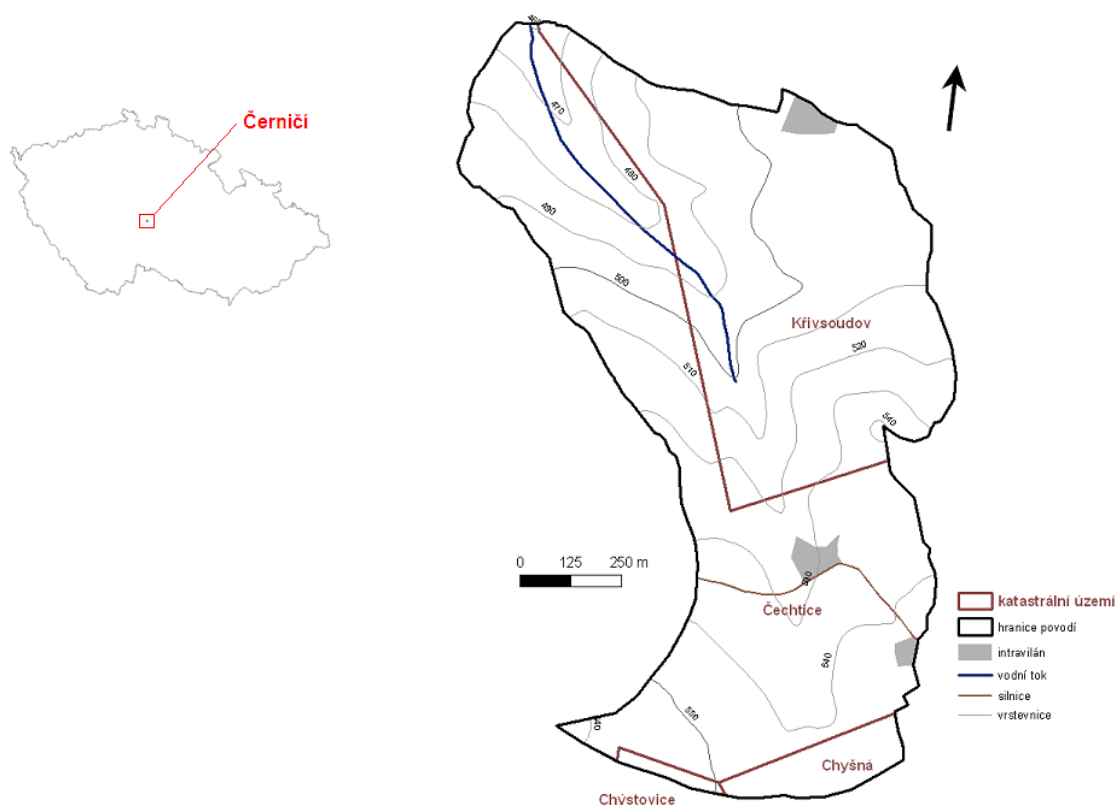
4. Zájmové povodí Černíčí

Kapitola 4 se ve své první části věnuje fyzickogeografickým podmínkám zájmového povodí. Druhá část je zaměřena na přehled dosavadních výzkumných aktivit v povodí Černíčí.

4.1. Fyzickogeografická charakteristika zájmového území

Zájmové území Černíčí, experimentální povodí bezejmenného toku, spravované VÚMOP, v. v. i. se nachází na jihovýchodě středních Čech. Pramenná oblast Čechtického potoka, která odvodňuje území o rozloze 1,34 km², patří k typickým povodím zemědělského rázu.

Obrázek 4.1: Poloha Černíčí v České republice



Zdroj: zpracováno na základě dat VÚMOP a ArcData ČR

Administrativně náleží převážná část zájmového území k obci s rozšířenou působností Vlašim. Leží v katastrech obcí Čechtice a Křivsoudov, které se nacházejí na jihovýchodě Středočeského kraje. Nepatrná část na jihu povodí náleží k obci s rozšířenou působností Pelhřimov, katastrům obcí Chyšná a Chýstovice, které leží na severozápadě v kraje Vysočina.

4.1.1. Geologie a geomorfologie

Podle regionálně geologického členění (Chlupáč, Štorch, 1992) patří zájmové povodí do moldanubické oblasti Českého masivu. Geologické podloží (obr. 4.2) je tvořeno převážně formací pararul předprvohorního až prvohorního stáří. Na západě povodí se nachází kvarcitové těleso stejného stáří. V horní části hlavního údolí a v údolí na pravé straně povodí jsou pararuly překryty kvartérními nezpevněnými smíšenými sedimenty deluvio-fluviálního původu. Dno dolní části hlavního údolí pokrývají hlinité, štěrkovité a písčité kvartérní sedimenty fluviálního původu (ČGS, 2010).

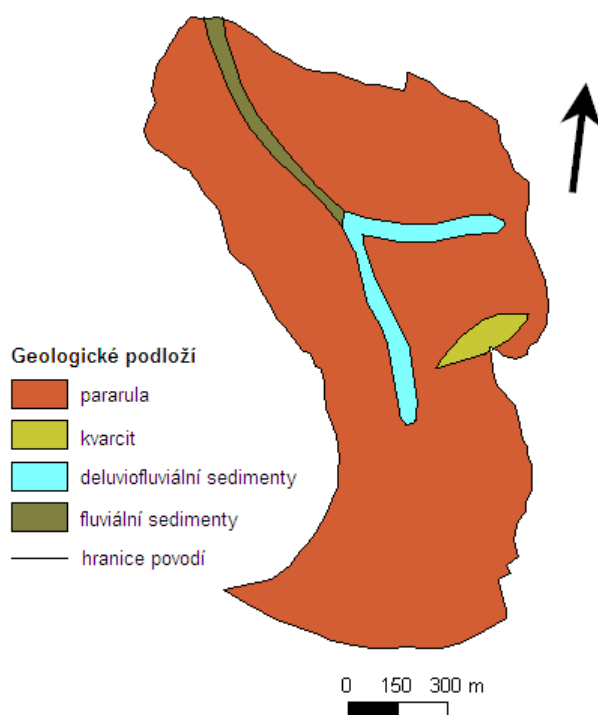
V rámci regionálně geomorfologického členění ČR náleží území do oblasti Českomoravské vrchoviny. Podrobné zařazení do geomorfologického systému je uvedeno v tabulce 4.1. Nadmořské výšky se pohybují mezi 462 m n. m. v závěrovém profilu a 562 m n. m. v jihozápadním cípu povodí. Povodí má pahorkatinný reliéf.

Tabulka 4.1: Zařazení zájmového území v geomorfologickém systému

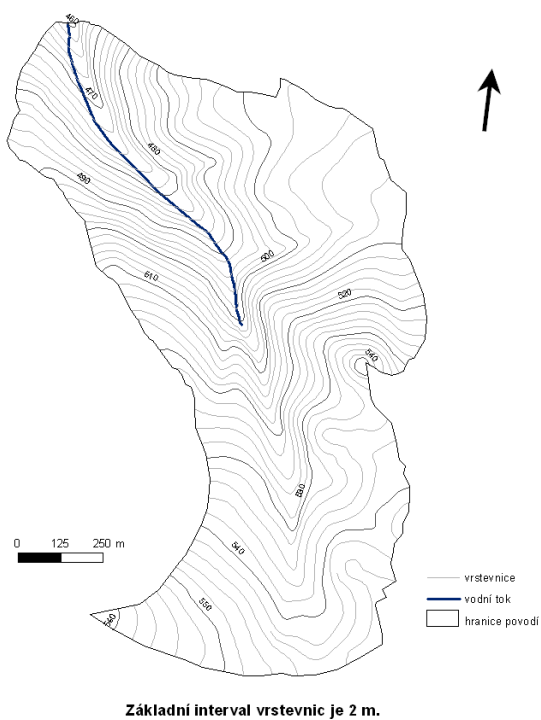
Systém	Hercynský
Provincie	Česká vysočina
Subprovincie	II Česko-moravská soustava
Oblast	IIC Českomoravská vrchovina
Celek	IIC – I Křemešnická vrchovina
Podcelek	II C-1C Želivská pahorkatina
Okrsek	II C – 1C1 Čechtická pahorkatina

Zdroj: Balatka, Kalvoda (2006)

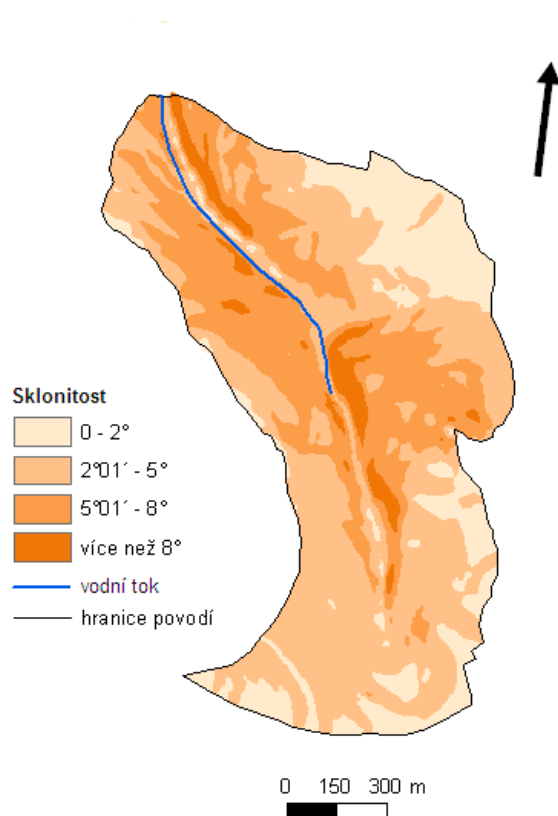
Průměrný sklon svahů v povodí je přibližně 3°20'. Ploché oblasti se sklonem do 5° v jižní, jihovýchodní a severovýchodní části povodí přecházejí svahy do poměrně hluboko zaříznutého hlavního údolí. Na svazích dosahují hodnoty sklonitosti i více než 8°. Maximální sklonitost, která náleží především mezím, se pohybuje okolo 12°. Vodní tok byl melioračními úpravami posunut vlevo od svého původního koryta, neprotéká tedy oblastí nízkých sklonů na dně údolí.

Obrázek 4.2: Geologické podloží v Černíči

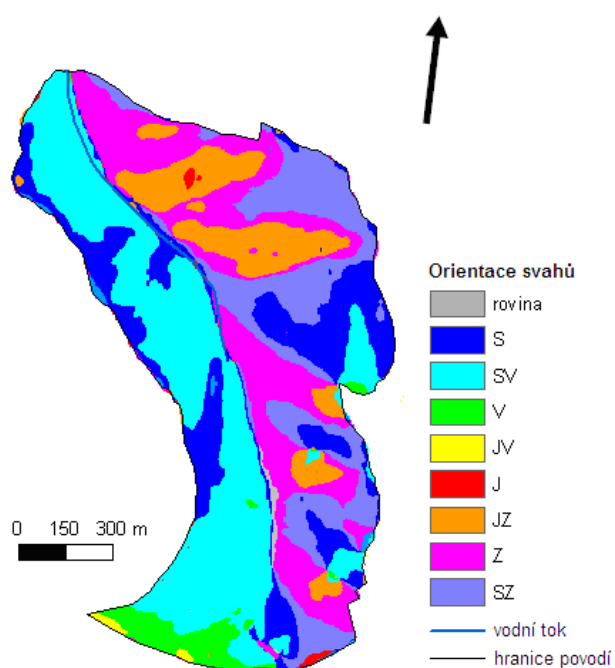
Zdroj: ČGS, 2010

Obrázek 4.3: Nadmořská výška v Černíči

Zdroj: zpracováno na základě dat VÚMOP

Obrázek 4.4: Sklonitost v Černíči

Zdroj: zpracováno na základě dat VÚMOP

Obrázek 4.5: Orientace svahů v Černíči

Zdroj: zpracováno na základě dat VÚMOP

Povodí je asymetrické rozlohou i členitostí terénu. Pravá část povodí zaujímá necelých 59 % jeho celkové rozlohy a je členitější. Z pravé strany ústí do hlavního údolí čtyři údolnice. Nejčastěji jsou zastoupeny svahy s orientací na severozápad až jihozápad. Z levé části povodí neústí do hlavního toku žádná údolnice. Orientace svahů je z velké části severní nebo severovýchodní.

Mapy na obrázcích 4.3, 4.4, 4.5 znázorňují výškové a sklonitostní poměry v povodí. Byly zpracovány na základě geodeticky vyměřených dat, která pro účely této práce poskytl VÚMOP.

4.1.2. Klimatické poměry

Podnebí zájmového území je dáno polohou v mírném pásu a nadmořskou výškou. Podle Quittova členění klimatu náleží povodí do mírně teplé klimatické oblasti MW7 (Atlas podnebí, 2007), jejíž souborné vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2: Obecné klimatologické charakteristiky mírně teplé oblasti MW7

Klimatická charakteristika	Hodnota
Počet letních dní	30-40
Počet dní s průměrnou teplotou 10°C a více	140-150
Počet dní s mrazem	110-130
Počet ledových dní	40-50
Průměrná lednová teplota	-2 - -3°C
Průměrná červencová teplota	16-17°C
Průměrná dubnová teplota	6-7°C
Průměrná říjnová teplota	7-8°C
Průměrný počet dní se srážkou 1mm a více	100-120
Suma srážek ve vegetačním období	400-450 mm
Suma srážek v zimním období	250-300 mm
Počet dní se sněhovou pokrývkou	60-80
Počet zatažených dní	120-150
Počet jasných dní	40-50

Zdroj: Atlas podnebí 2007

Průměrná roční teplota je zde podle Atlasu podnebí (2007) 7,5°C, nejteplejší měsícem je červenec, naopak nejchladnějším měsícem je leden.

Srážkový úhrn v povodí se dlouhodobě pohybuje mezi 650-750 mm za rok. Přibližně dvě třetiny srážek spadne během období mezi květnem a srpnem. Srážkově nejbohatším měsícem je červenec. Srážky vyvolávající extrémní odtok se vyskytují především mezi květnem až srpnem.

Tabulka 4.3 uvádí srážkové a teplotní charakteristiky sledovaného území v období 1901-1990. Zprůměrnovaný oblastní normál vychází z pozorovaných (a rektifikovaných s ohledem na nadmořskou výšku) hodnot na okolních stanicích (Čechtice, Košetice, Humpolec-Dusilov, Olešnice-Valečov a Petrovice) v období 1901-1950. Za období 1961-1990 jsou dostupná data z nejbližší meteorologické stanice Čechtice. Na základě porovnání těchto řad lze konstatovat, že období 1901-1950 bylo oproti období 1961-1990 celkově sušší, avšak přibližně stejně teplé (Johanovský, 2004).

Od roku 1991 probíhá měření charakteristik přímo v povodí Černíči. Podrobnou analýzu srážko-odtokových poměrů od roku 1991 uvádí kapitola 5.

Tabulka 4.3: Klimatologické charakteristiky povodí v Černíči

Období	Zprůměrnovaný oblastní normál (1901-1950)		Čechtice (1961-1990)	
	Srážky (mm)	Teploty (°C)	Srážky (mm)	Teploty (°C)
Leden	41,3	-2,8	47,5	-2,7
Únor	37,3	-1,7	40,3	-1,2
Březen	36,3	2,2	45,8	2,7
Duben	50,0	6,5	53,1	6,9
Květen	67,3	11,8	86,2	11,8
Červen	77,0	14,6	85,1	15,2
Červenec	84,7	16,4	86,1	16,5
Srpen	76,7	15,6	86,6	16
Září	50,7	12,2	53,4	13
Říjen	53,7	7,2	47,5	7,9
Listopad	41,7	2,1	48,3	2,9
Prosinec	44,0	-1,3	44,5	-1,1
Vegetační období (III-VIII)	406,3	12,9	450,5	13,2
Mimovegetační období (IX-II)	254,3	1	273,9	1,5
Roční	660,7	7	724,4	7,3

Zdroj: Johanovský (2004)

4.1.3. Hydrologické poměry

V povodí je jeden stálý vodní tok bez stálých přítoků, na kterém je umístěný měrný profil. Jedná se o bezejmenný potok VIII. řádu hydrologického pořadí 1-09-02-105. Náleží do povodí Labe. Bezejmenný tok ústí v obci Černíči do potoka Černíči, který dále pokračuje do Čechtického a Sedlického potoka. Sedlický potok ústí do nádrže Němčice, která slouží jako předřazená vodní nádrž přehrady Švihov na Želivce. Povodí se nachází se ve III. ochranném pásmu vodárenské nádrže.

Do bezejmenného toku ústí z pravé strany několik suchých údolnic, ve kterých se při přívalových deštích a tání sněhu se soustřeďuje povrchový odtok. Z obrázku 4.6 jsou patrné dráhy soustředěného odtoku v povodí.

Horní úsek toku, dlouhý asi 650 m, je zatrubněn. Následně teče otevřeným korytem. Nad závěrovým profilem, v délce přibližně 900 m, je koryto přeloženo z osy údolí nalevo a upraveno jako meliorační odpad. Dno a paty břehů jsou vydlážděny hladkými betonovými dlaždicemi. Úpravy koryta byly provedeny v roce 1981 (Johanovský, 2004).

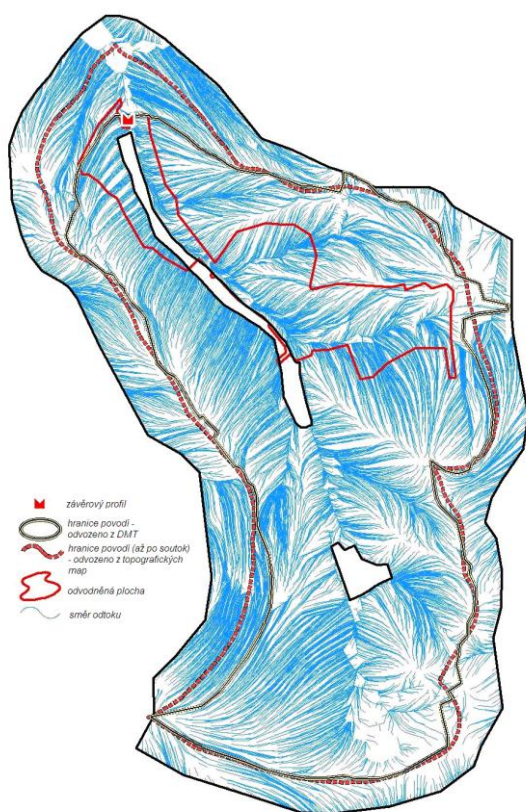
Hydrografické charakteristiky povodí jsou uvedeny v tabulce 4.5 na konci této kapitoly. Odtokovým charakteristikám toku se podrobně věnuje kapitola 5.

Puklinová propustnost horninového prostředí určuje míru zvodnění. Transmisivita v povodí se pohybuje v rozmezí $9,8 \cdot 10^{-6}$ a $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Odchylka od průměrných poměrů se vyskytuje v oblasti druhé údolnice zprava, kde je pozorovaná trvalá hladina mělké podzemní vody a pramenný vývěr (Johanovský, 2004).

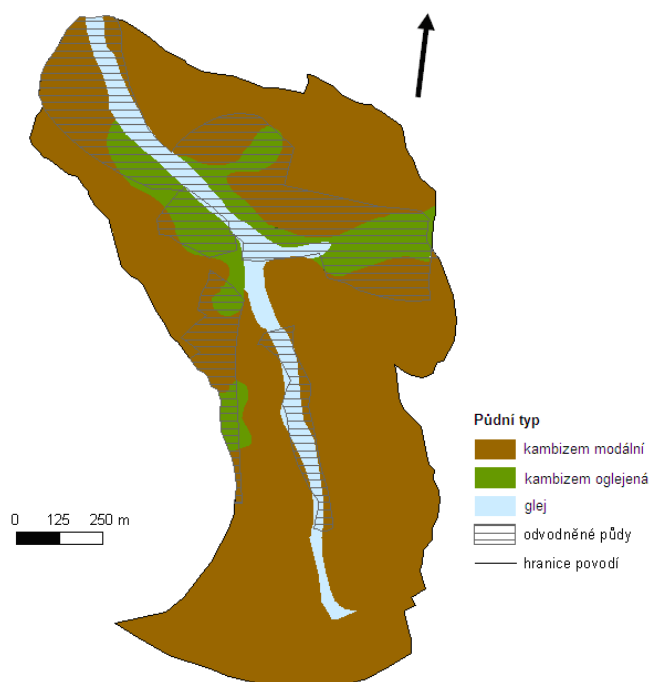
4.1.4. Půdní pokryv

Rozložení půdních typů v povodí je dáno geologickým podložím a reliéfem. V povodí se vyskytují dva půdní typy: kambizem a glej (VÚMOP, 2009; ČGÚ, 1996).

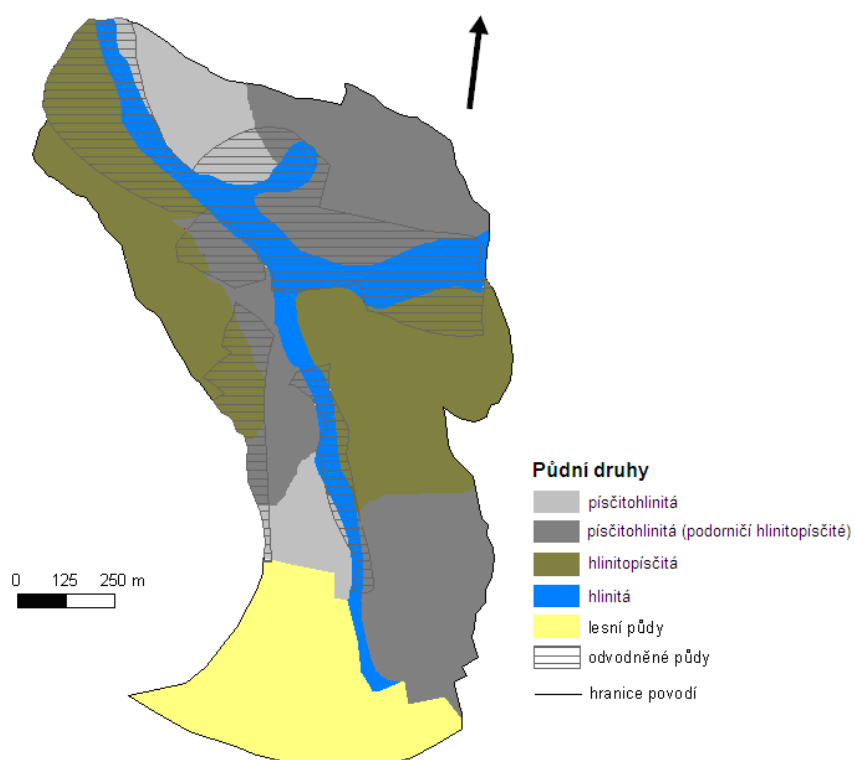
Na svazích tvoří půdní pokryv modální kambizem. Půdy jsou hluboké až středně hluboké. Podložní hornina vychází na povrch v lokalitě Hoříčka na východě povodí. Tyto půdy jsou kyselé, na zalesněném území na jihovýchodě povodí silně kyselé. Podle kartogramu zrnitosti, skeletovitosti a zamokření půd okresu Benešov (1972) jsou tyto půdy hlinitopísčité až písčitohlinité.

Obrázek 4.6: Dráhy soustředěného odtoku v Černíči

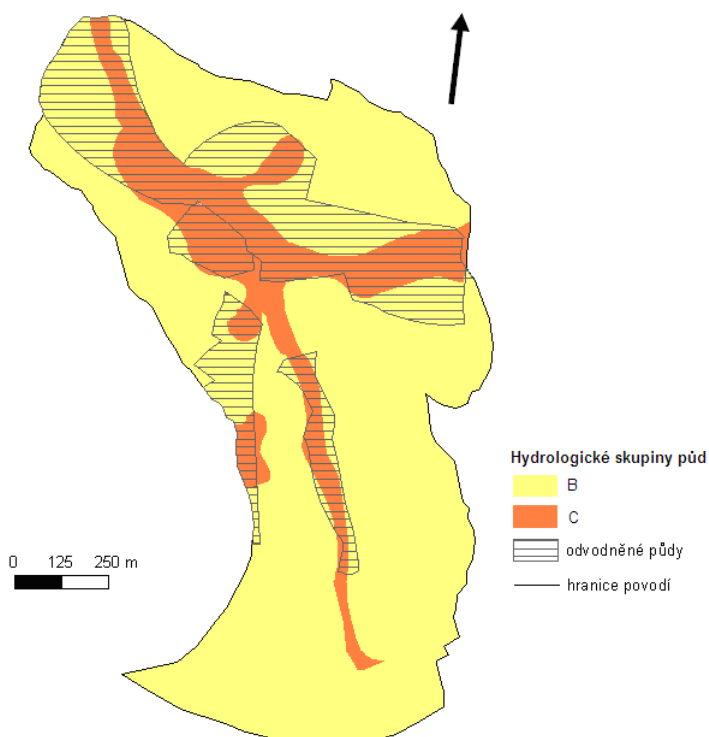
Zdroj: www.hydromeliorace.cz, 12. 12. 2009

Obrázek 4.7: Půdní typy v Černíči

Zdroj: zpracováno na základě dat VÚMOP a ČGS

Obrázek 4.8: Půdní druhy v Černíči

Zdroj: Kartogram zrnitosti, skeletovitosti a zmokření, okres Benešov

Obrázek 4.9: Hydrologické skupiny půd v Černíči

Zdroj: zpracováno na základě dat VÚMOP a ČGÚ

V hlavní údolnici se vyskytuje glej vzniklý na nivních uloženinách. Glejové půdy jsou hlinité, bezskeletovité, hluboké až středně hluboké. Trvalé zamokření je způsobeno spodní vodou. V suchých údolnicích a v okolí vodního toku v dolní části povodí se nacházejí oglejené kambizemě. V oblasti druhé údolnice zprava se vyskytují oglejené kambizemě vzniklé na svahových hlínách, které jsou středně těžké až těžké a hluboké. V oblasti první suché údolnice zprava a podél vodního toku jsou půdy hlinité, lehké až středně těžké a slabě skeletovité. Oglejená kambizem má sklony k sezónnímu zamokřování povrchovou vodou a zvýšenou náchylnost vůči erozi.

Hydrologické skupiny půd udávají schopnost infiltrace vody do půdy bez pokryvu po dlouhodobém syčení. Podle Janečka (2007) náleží půdy nacházející se v povodí do hydrologických skupin B a C. Hydrologická skupina půd B pokrývá většinu povodí. Jedná se o půdy se střední rychlostí infiltrace i při úplném nasycení a středně až dobře odvodněné. Hydrologická skupina půd C se nachází v údolích. Tyto půdy se vyznačují nízkou schopností infiltrace i při úplném nasycení a přítomností málo propustné vrstvy v půdním profilu s vysokým obsahem jílu.

Na části plochy povodí byl v roce 1981 realizován projekt odvodnění půd. Rozsah odvodnění ukazuje obrázek 4.10. Celková rozloha odvodněných půd je 0,37 km², tj. 28 % celkové plochy povodí a 33 % zemědělské půdy v povodí (Johanovský, 2004).

4.1.5. Využití území

Výzkumné povodí Černíčí je převážně zemědělského rázu. Zemědělská půda tvoří v současnosti 78,4 % jeho rozlohy (69,4 % orná půda, 9 % trvalé travní porosty). Trvalé travní porosty se nacházejí v dolní části povodí napravo podél toku, v druhém suchém údolí ústícím zprava do vodního toku a v horní části povodí v úzkém pásu podél lesa. Zemědělskou půdu obhospodařují dva podniky: Zemědělské družstvo Čechtice a Zemědělská společnost Křivsoudov.

Lesnatost povodí je nyní přibližně 20,1 %. Lesy se nacházejí na jižní až jihozápadní části povodí a na malé ploše na východě povodí na hranici s rozvodnicí. Podél vodního toku v dolní části povodí se vyskytuje lesnaté pásmo.

Zastavěná plocha tvoří 1,5 % z plochy povodí. V horní části povodí se nachází obecní část Krčmy, která do povodí zasahuje několika domy. Jedná se o venkovskou zástavbu s velkým množstvím zahrad, dnes využívanou převážně k rekreačním účelům. Do

severovýchodní části povodí okrajově zasahuje část obce Křivsoudov - Jenišovice, kterou tvoří opuštěná zemědělská usedlost.

Podle Culka a kol. (1996) bylo území povodí Černičí bylo zalesněno až do 10. století. Poměr bezlesí a lesních kultur se od středověku prakticky nezměnil. Převážně byly lesy změněny na monokultury smrku.

V minulosti docházelo ke změnám využití území (tab. 4.4). Na základě srovnání aktuálních map s Císařskými otisky stabilního katastru z roku 1850 a s topografickými mapami z let 1920, 1955 a 1985 vyplývá, že ke změnám docházelo především ve střední části povodí. Až do roku 1955 se jednalo o drobné změny z orné půdy na trvalé travní porosty a naopak. Po realizaci projektu odvodnění v roce 1981 se výrazně navýšil podíl orné půdy na úkor TTP. Došlo k rozorání louky ve střední části pravé strany povodí. V této oblasti se stále shromažďuje povrchový odtok. Jak je patrné na mapách z roku 1850, údolnicí protékal potok. Na novějších mapách již není zaznačen, protože ty vycházejí z mapových podkladů menších měřítek. V létě 2003 byla lokalita s ohledem na morfologické a odtokové poměry a problémy s erozí opět částečně zatravněna (rozhraní honů 5150 a 5151) (VÚMOP, 2009). Na obrázku 4.13 je patrné, že v oblasti docházelo k zamokřování a vzniku soustředěného odtoku, který podněcoval erozi.

Navýšení podílů lesů po roce 1985 je dáno přirozeným zalesněním na levém břehu potoka, který přestal být obděláván jako louka. V 50. letech 20. století byla v Jenišovicích postavena zemědělská budova, čímž se zvedl podíl zastavěné plochy v povodí o 1%. V minulosti docházelo také k častým změnám sítě cest.

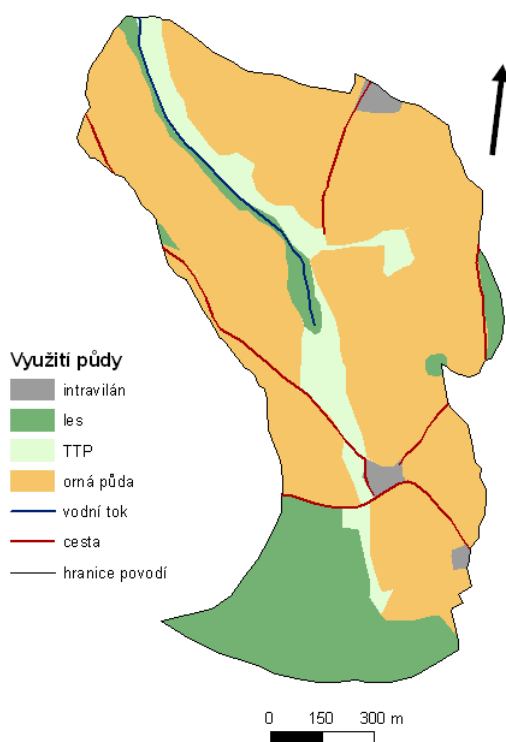
Tabulka 4.4: Změny využití území v Černičí (v % plochy povodí)

Využití půdy	1850	1920	1955	1985	2009
Orná půda	64,7	65,1	63,1	75	69,4
TTP	16,7	17,3	17,7	7,5	9
Lesy	18,1	17	17,7	16	20,1
Intravilán	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5

Zdroj: výpočet na základě Císařských otisků stabilního katastru (1850), Topografická mapa list 4154-3, 4154-4 (1920), Mapa Generálního štábu čs. armády, list M-33-91-A-a Čechtice (1955 a 1985), Ortofoto ČÚZK (2009)

Obrázek 4.10: Rozsah odvodnění v povodí Černíči

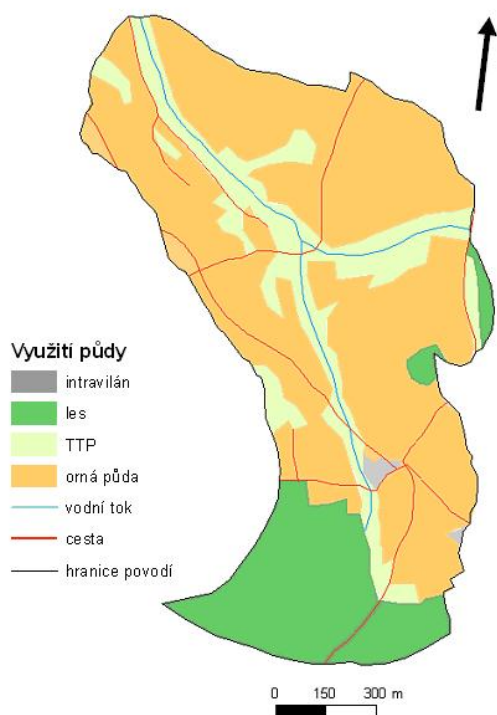
Zdroj: www.hydromeliorace.cz, 12. 12. 2009

Obrázek 4.11: Využití půdy v Černíči (2010)

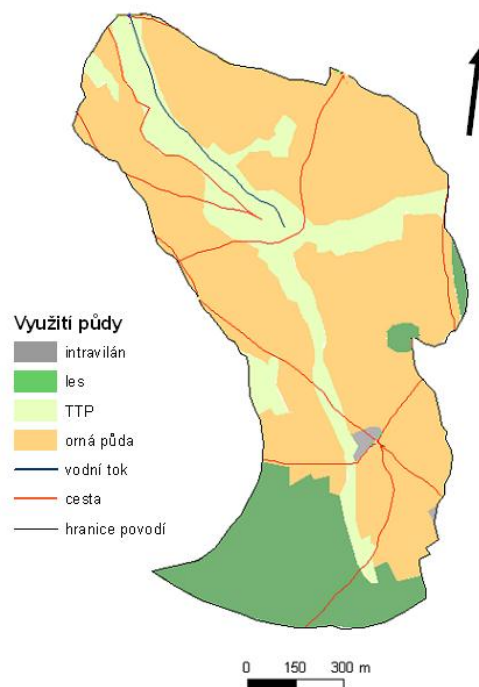
Zdroj: odvozeno z ortofotomap (ČÚZK)

Obrázek 4.12: Využití půdy v Černíči a. 1850, b. 1920, c. 1955, d. 1985 (čísla na mapě označují hony)

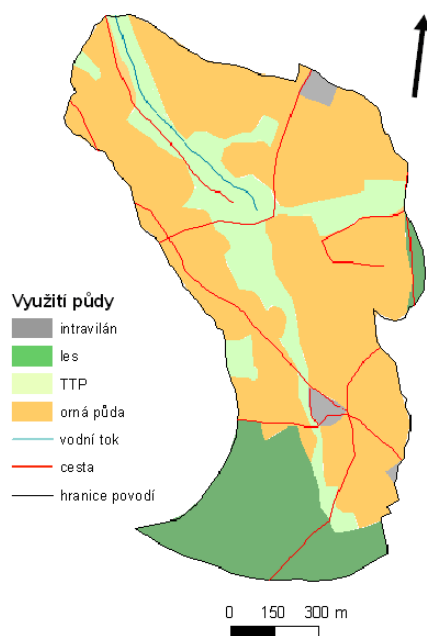
a. 1850



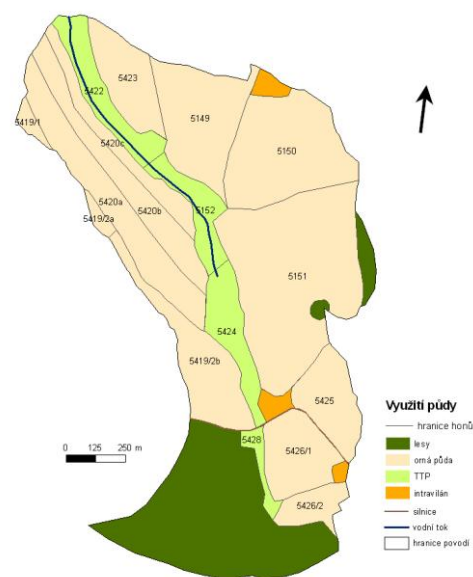
b. 1920



c. 1955



d. 1985



Zdroj: odvozeno na základě Císařských otisků stabilního katastru (1850), Topografická mapa list 4154-3, 4154-4 (1920), Mapa Generálního štábu čs.armády, list M-33-91-A-a Čechovice (1955 a 1985), Ortofoto ČÚZK (2009).

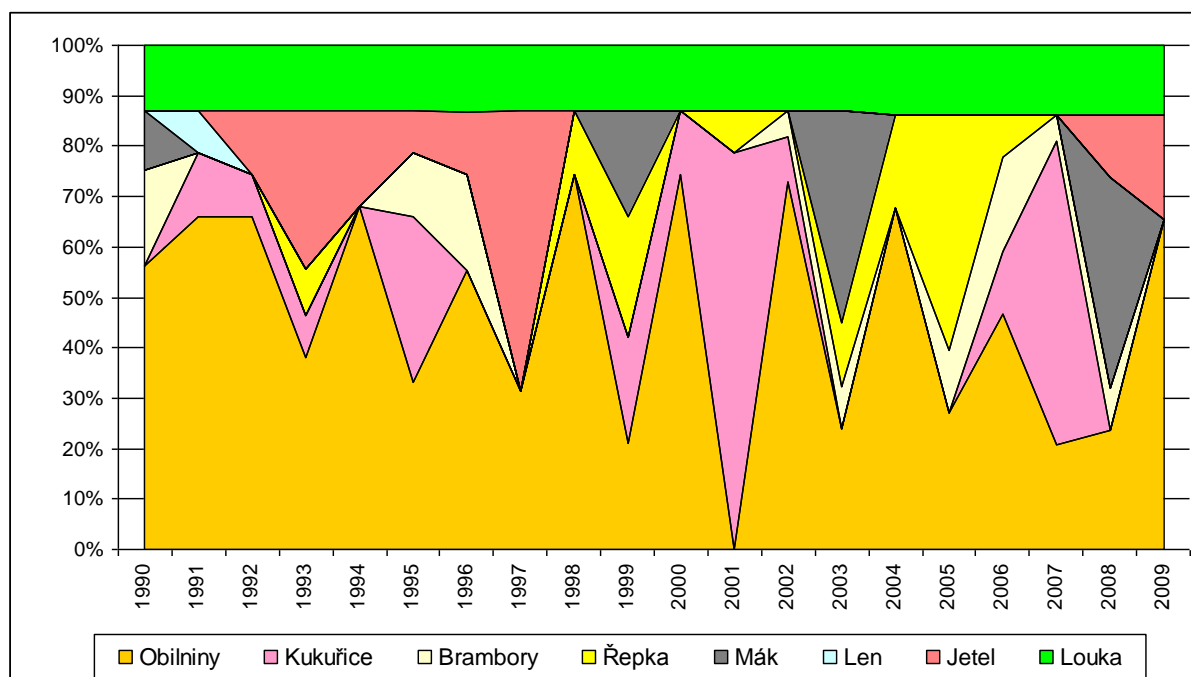
Obrázek 4.13: Zatravnění údolnice (situace před - vlevo a po roce 2003 - vpravo)

Zdroj: www.mapy.cz, 1. 2. 2010

4.1.6. Flora a fauna

Podle Culka a kol. (1996) náleží povodí Černíčí do hercynské podprovincie, leží v přechodné nereprezentativní zóně mezi Posázavským a Pelhřimovským regionem. Území leží v mezofytiku ve fytogeografickém okrese 42b Táborsko-vlašimská pahorkatina. Podle Zlatníkova systému patří do jedlovo-bukového stupně (Atlas ČSSR, 1984). Mezi lesy na sledovaném území však převládá kulturní smrčina. Zbytek území je tvořený zemědělskou půdou, na které jsou pravidelně obměňovány kulturní plodiny. Základ osevních postupů tvoří obilniny. Souhrnný přehled plodin pěstovaných v povodí od roku 1990 uvádí graf 4.1 a tabulka 4.6.

Na území je zastoupena ochuzená fauna kulturní krajiny Českomoravské vrchoviny. Mezi významné druhy žijící v povodí patří ježek západní, ježek východní, lejsek malý, ořešník kropenatý, ještěrka živorodá, zmije obecná, mihule potoční. Sledovaný vodní tok náleží do pstruhového pásma (Culek a kol., 1996).

Graf 4.1: Podíl jednotlivých plodin na zemědělské půdě v Černíči (1990-2009)

Zdroj: Kletečka (2009), Pražák (2010)

Obrázek 4.14: Zemědělský ráz krajiny v Černíči

Zdroj: vlastní foto (6. 9. 2009)

Tabulka 4.5: Základní geometrické a číselné charakteristiky povodí v Černíči

Charakteristika	Hodnota	Jednotka	Poznámka
Průměrná zem. šířka	49°37′	s.z.š.	49°36′39″ - 49°36′55″
Průměrná zem. Délka	15°04′	v.z.d.	15°04′37″ - 15°05′24″
Plocha povodí	1,34	km ²	P
Plocha povodí – levá strana	0,55	km ²	41,04% P
Plocha povodí – pravá strana	0,79	km ²	58,96% P
Nadm. výška – prům.	516	m n.m.	
Nadm. výška – min.	462	m n.m.	
Nadm. výška – max.	562	m n.m.	
Převýšení povodí	100	m	Δh
Délka rozvodnice	5,7	km	L_R
Gravelliův koeficient	1,39		$K_G = 0,5 L_R \cdot (P \cdot \pi)^{-0,5}$
Koeficient protáhlosti povodí	0,65		$R_E = 2 \cdot (P / \pi)^{0,5} \cdot L^{-1}$
Délka povodí	2,02	km	L
Charakteristika povodí α	0,33		$\alpha = P \cdot L^{-2}$
Tvar povodí	vějířovitý		
Celková délka sítě údolnic	4,3	km	Celkem 5 údolnic
Délka hlavní údolnice	2,1	km	
Maximální výška toku	543	m n.m.	
Minimální výška toku	462	m n.m.	
Převýšení hlavní údolnice	81	m	
Délka údolnic zleva	0	km	
Délka údolnic zprava	2,2	km	4 údolnice
Hustota sítě údolnic	3,2	km.km ⁻²	Všechny údolnice v povodí
Průměrná délka svahů	0,17	km	
Průměrná délka svahů – zleva	0,29	km	
Průměrná délka svahů – zprava	0,13	km	
Koeficient souměrnosti plochy povodí	0,18		$\alpha = P_{\text{levá}} - P_{\text{pravá}} \cdot P^{-1}$
Průměrný sklon povodí	3°20′	°	
Koeficient reliéfu	0,05		$R_h = \Delta h \cdot L^{-1}$
Řádovost toku absolutní	VII		
Řádovost toku podle Strahlera	1		Nezohledňuje občasné toky

Zdroj: Johanovský (2004), vlastní výpočty

Tabulka 4.6: Pěstované plodiny v Černíči (podle honů)

HON	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
5419	Ječmen jarní	Len	Kukuřice	Kukuřice	Ječmen jarní	Jetel I.	Jetel II.	Jetel II.	Pšenice ozimá	Pšenice ozimá
5420	Brambory	Pšenice ozimá	Ječmen jarní	Jetel II.	Jetel II.	Pšenice ozimá	Brambory	Pšenice ozimá	Ječmen ozimý	Řepka
5422 ^{*)}	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka
5423	Pšenice ozimé	Oves	Žito	Ječmen jarní	Ječmen jarní	Triticale	Jetel I.	Jetel II.	Pšenice ozimá	Řepka
5424 ^{*)}	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka
5425	Ozimá pšenice	Řepka ozimá	Jetel I.	Jetel II.	Pšenice ozimá	Brambory	Pšenice ozimá	Ječmen ozimý	Řepka	Pšenice ozimá
5426	Ozimá pšenice	Řepka ozimá	Jetel I.	Jetel II.	Pšenice ozimá	Brambory	Pšenice ozimá	Ječmen ozimý	Řepka	Pšenice ozimá
5428	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka
5149	Ječmen jarní	Ozimá pšenice	Ozimý ječmen	Řepka	Ozimá pšenice	Triticale	Ječmen s podsevem	Jetel	Žito	Mák
5150	Mák	Ozimý ječmen	Ozimá směska	Triticale	Ozimá pšenice	Kukuřice	Ječmen s podsevem	Jetel	Žito ozimé	Mák
5151	Jarní ječmen	Ozimý ječmen	Ozimá směska	Triticale	Žito	Kukuřice	Ječmen s podsevem	Jetel	Žito ozimé	Kukuřice
5152 ^{*)}	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka
HON	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
5419	Ječmen ozimý	Řepka	Pšenice ozimá	Brambory	Pšenice ozimá	Ječmen ozimý	Řepka	Pšenice ozimá	Brambory	Jetel I.
5420	Pšenice ozimá	Kukuřice	Pšenice ozimá	Ječmen jarní	Řepka	Pšenice ozimá	Brambory	Kukuřice	Ječmen jarní	Ječmen ozimý
5422 ^{*)}	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka
5423	Pšenice ozimá	Kukuřice	Brambory	Pšenice ozimá	Ječmen ozimý	Řepka	Pšenice ozimá	Brambory	Ječmen jarní	Ječmen ozimý
5424 ^{*)}	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka
5425	Kukuřice	Kukuřice	Ječmen jarní	Řepka	Pšenice ozimá	Brambory	Kukuřice	Oves	Jetel I.	Jetel II.
5426	Kukuřice	Kukuřice	Ječmen jarní	Řepka	Pšenice ozimá	Brambory	Kukuřice	Oves	Jetel I.	Jetel II.
5428	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	louka
5149	Pšenice ozimá	Kukuřice	Kukuřice	Mák	Ječmen ozimý	Řepka ozimá	Pšenice ozimá	Kukuřice	Mák	Pšenice
5150	Pšenice ozimá	Kukuřice	Pšenice ozimá	Mák	Ječmen ozimý	Řepka ozimá	Pšenice ozimá	Kukuřice	Mák	Pšenice
5151	Oves	Kukuřice	Pšenice ozimá	Mák	Ječmen ozimý	Řepka ozimá	Pšenice ozimá	Kukuřice	Mák	Pšenice
5152 ^{*)}	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka	Louka

*) částečně přeměněno na les

Zdroj: Kletečka (2009), Pražák (2010)

Tabulka 4.7: Obhospodařování půdy v Černíči

Hon	Název	Výměra (ha)	Zemědělský podnik	Hon	Název	Výměra (ha)	Zemědělský podnik
5419	Hendryška	9,4	ZD Čechtice	5426	Za Zytou	8,6	ZD Čechtice
5420	Vinice	21,2	ZD Čechtice	5428	Krčemské louky	1,2	ZD Čechtice
5422	Za Kovárnou louka	5	ZD Čechtice	5149	Sekerka	10,2	ZS Křivsoudov
5423	Za Kovárnou role	5,7	ZD Čechtice	5150	Odchovna	13,3	ZS Křivsoudov
5424	Krčmy III.	4,6	ZD Čechtice	5151	Hoříčka	23,7	ZS Křivsoudov
5425	Před Hájenkou	5,5	ZD Čechtice	5152	Pod Sekerkou	3,7	ZS Křivsoudov

Zdroj: VÚMOP (2009)

4.2. Výzkum v Černíči

Území zájmového povodí Černíči je soustavně sledováno od roku 1990, kdy bylo vybaveno přístroji k pravidelnému sledování hydrometeorologických jevů. Jako jedno z pokusných povodí VÚMOP sloužilo nejprve k monitorování erozních smyvů a plošného znečištění způsobeným zemědělskou výrobou v povodí vodárenské nádrže Švihov. Povodí v Černíči bylo vybráno jako výzkumná plocha na základě svého zemědělského charakteru. Nevyskytují se zde žádné bodové zdroje znečištění.

Množství měřených charakteristik a jevů v povodí se průběžně přizpůsobovalo potřebám vědeckých záměrů. Od roku 1990 proběhl v Černíči výzkum v těchto oblastech:

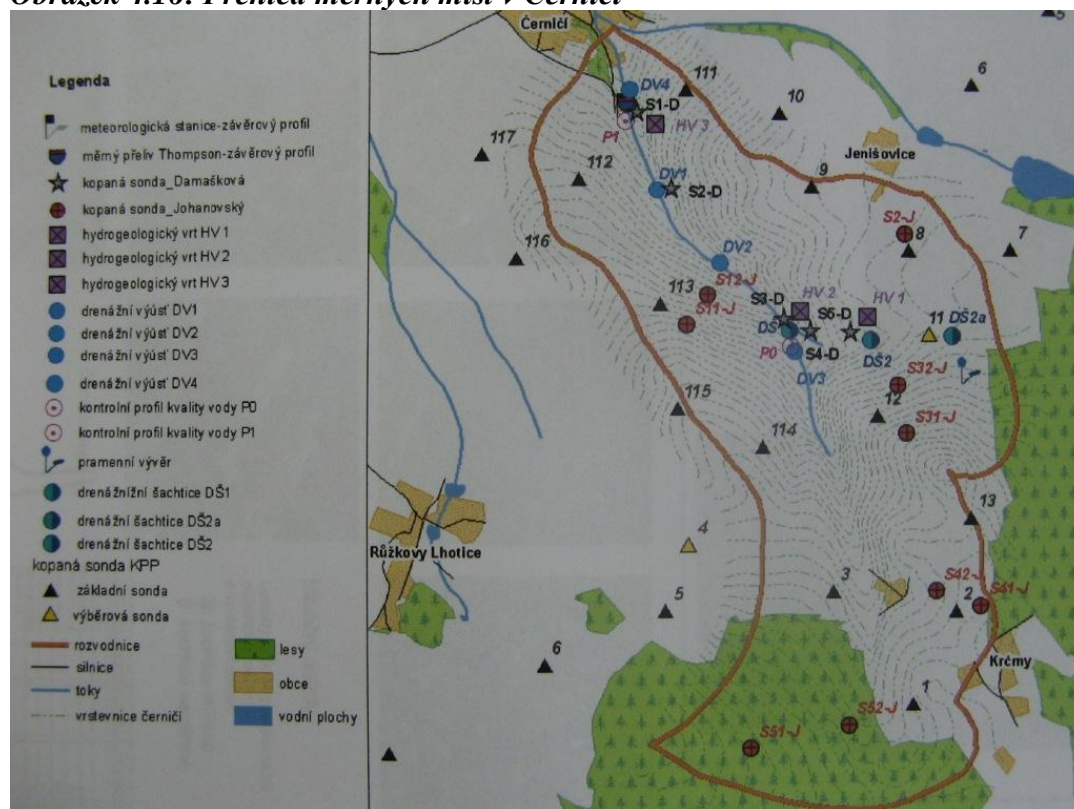
- Sledování hydrometeorologických charakteristik povodí
- Hodnocení složek hydrologické bilance v povodí (Doležal a kol., 2001)
- Analýza kvality povrchových a drenážních vod (Kvítek a kol., 2001; Fučík, 2007)
- Transport anionů půdním profilem (Čížek, 2001) a kalibrace modelů pohybu půdní vody (Damašková, 1996)
- Sledování eroze a erozních smyvů (Tippl, 2001; Janeček, 2004; Tippl a kol. 2008)
- Aplikace hydrologického modelu KINFIL (Kovář a kol., 2004)
- Rozsah a funkce zemědělských odvodňovacích systémů (Soukup, 2001; Kulhavý, 2005; Kulhavý 2006)

Souhrnné zpracování informací o monitoringu na experimentálních povodích je uveřejněno na internetové stránce řešitelských týmů www.hydromeliorace.cz.

V roce 2008 byl v povodí instalován vzorkovač SIGMA 900 MAX Přírodovědecké fakulty UK k odebírání vzorků vody za účelem analýzy vlastností látkového odnosu při mimořádných srážko-odtokových událostech (viz kapitola 3.2.). Na jaře 2009 byla v Černíči instalována vodivostní sonda (obr. 4.15), pomocí které lze měřit koncentraci rozpuštěných látek ve vodě.

Obrázek 4.15: Vodivostní sonda v Černíči

Zdroj: foto Z. Kliment (12. 4. 2009)

Obrázek 4.16: Přehled měrných míst v Černíči

Zdroj: Kulhavý (2006)

4.2.1. Měření hydrometeorologických charakteristik

Stanice pro hydrometeorologická pozorování je umístěna v závěrové části povodí v nadmořské výšce 462 m n. m. V rámci sledování hydrometeorologických jevů jsou v Černíči soustavně měřeny tyto charakteristiky: výška hladiny v měrném profilu, teplota vody v korytě, teplota půdy (v hloubkách 10, 20, 50 cm), teplota vzduchu (ve výšce 200 cm), srážky, vlhkost vzduchu, výpar a intenzita slunečního záření. Závěrový profil se nachází 270 m od soutoku s tokem Černíči. V profilu jsou nainstalovány

Thompsonův ostrohranný měrný přeliv s výškou výřezu 60 cm, limnigraf a vodočetná lať (obr. 4.17).

Sledování jevů bylo v roce 2005 modernizováno. Stanice byla vybavena přístroji pro automatické měření a přenos dat. Klasický srážkoměr byl nahrazen digitálním srážkoměrem s překlopnou nádobkou. Automatický ultrazvukový hladinoměr zaznamenává výšku hladiny v desetiminutovém intervalu. Naměřená data jsou dostupná na datovém serveru www.fiedler-magr.cz po zadání přihlašovacích údajů.

Obrázek 4.17: Stanice pro klimatologická a hydrologická pozorování v Černíči



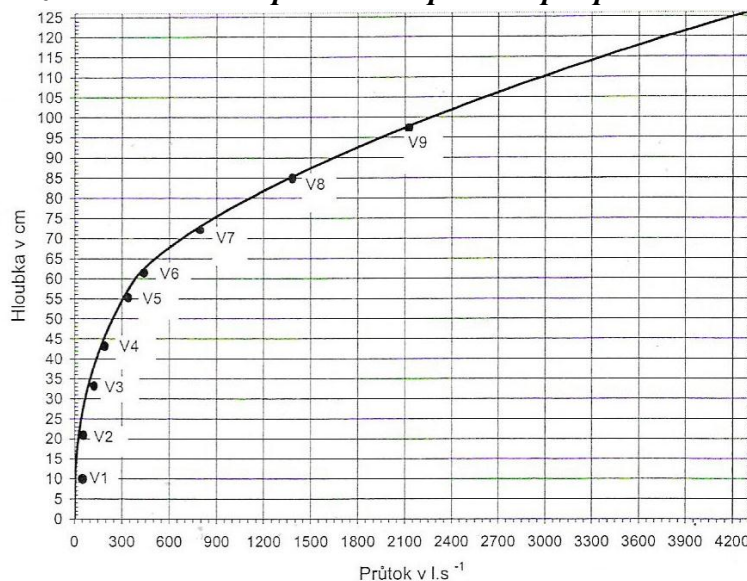
Zdroj: vlastní foto (8. 8. 2009), vlastní foto (6. 2. 2009)

Konsumpční křivka průtoků (obr. 4.18) vychází z rovnice $Q = 0,0146 \cdot h^{2,5} \text{ [l.s}^{-1}\text{]}$, kde Q je okamžitý průtok a h výška hladiny (do 60 cm) v měrném přelivu [cm]. Při měření extrémně velkých průtoků v malých povodích výsledky velmi snadno podléhají chybě způsobené obtížně definovatelnými hydraulickými poměry a nepřesnosti měření či odhadu velkých přepadových výšek. Statistické charakteristiky průtoků v období 1991-2001 jsou uvedeny v tabulce 4.8.

Tabulka 4.8: Statistické charakteristiky průtoků v Černíči za období 1991-2001

Charakteristika	Černíči (1991-2001)
Maximum Q_d	$0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Maximum q_d	$0,8386 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$
Minimum q_d	$0 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$
Směrodatná odchylka q_d	$0,0590 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$
Průměrný odtok q_d	$0,03333 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$
Součinitel variace	1,7732
Součinitel asymetrie	5,2
Medián q_d	$0,0123 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$

Zdroj: Kulhavý a kol. (2001)

Obrázek 4.18: Konsumpční křivka průtoků pro povodí Černíčí

(V1 - V9 označují odběry vzorků vody jednoduchým vzorkovačem, viz kap. 4.2.5.)

Zdroj: Tippl (2001)

4.2.2. Určení složek hydrologické bilance

Doležal a kol. (2001) se zabýval stanovením jednotlivých složek hydrologické bilance v Černíčí (tab. 4.9). Výsledky srovnal s výsledky z ostatních experimentálních ploch, které vykazují podobné charakteristiky. Při vyčíslení jednotlivých složek hydrologické bilance v Černíčí byla použita data naměřená v povodí a data ČHMÚ pořízená na meteorologické stanici Košetice.

Podle Doležala a kol. (2001) se součinitel odtoku $\phi_{odt.}$ pohybuje mezi 0,1-0,2, tato hodnota je však meziročně velmi proměnlivá. Většina vody spadlé v povodí P se vypaří, na evapotranspiraci ET_0 se spotřebovává až 80 % celkového množství srážek. V Černíčí nedochází ke ztrátám vody způsobené odběrem vody pro obyvatelstvo. Ztráta $\phi_{ztr.}$ je způsobena podzemním odtokem mimo závěrový profil.

Při porovnání hodnot s výsledky z jiných experimentálních povodí Doležal a kol. (2001) uvedl, že se povodí Černíčí od ostatních zásadně ve sledovaných obdobích nelišilo. Výsledky analýzy jsou však zatíženy chybou způsobenou nesprávným měřením průtoku při povodňových vlnách.

Tabulka 4.9: Hodnoty jednotlivých složek hydrologické bilance v Černíči

Složka hydrologické bilance (mm/rok)	1992-1993	1993	1998-1999
P	607	620	597
ET ₀	488	465	437
Q	83	81	114
P-Q	524	539	483
φ odt.	0,137	0,131	0,191
φ ztr.	0,059	0,119	0,077

Zdroj: Doležal a kol. (2001)

4.2.3. Analýza kvality vody

V povodí Černíči v současnosti v rámci chemického a biochemického monitoringu sledovány tyto veličiny: nerozpuštěné látky, amonné ionty, dusičnany, rozpustné fosforečnany a celkový fosfor. Vzorky jsou odebírány a analyzovány každé dva týdny. Na základě hodnocení kvality povrchových a drenážních vod byl vodní tok v Černíči v roce 2001 stále zařazován do V. třídy jakosti vod (Kvítek a kol., 2001).

Jako jeden z nejvýraznějších antropogenních výstupů z povodí jsou považovány dusičnany ve vodách, které indikují narušení přírodního prostředí a jeho autoregulační stabilitu. Znečištění dusičnany způsobuje hnojení dusíkem a narušení a nestabilita systému krajiny. Dusičnanové znečištění drenážních vod v povodí bylo vyšší než znečištění vod povrchových. Kvítek (1999) uvedl, že koncentrace dusičnanů v povodí vodní nádrže Švihov mají vzestupný trend. Na základě analýzy z mnoha dílčích povodí prokázal velkou nestabilitu a narušení ekosystému vodní nádrže Švihov.

Koncentrace dusičnanů v povodí Černíči vykazovala typickou mezisezónní rozkolísanost: maxima byla dosahována v zimě a předjaří ($90-100 \text{ mg NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$), minima naopak v létě a začátkem podzimu. Během sledované periody 1991-2000 docházelo k setrvalému meziročnímu poklesu hodnot koncentrací dusičnanů (díličího maxima bylo dosaženo v letech 1993-1995 a 1999-2000). Vyplavování dusičnanů v jednotlivých letech bylo ovlivněno rozdílným chodem počasí v daném roce; kolísání koncentrací dusičnanů bylo výsledkem způsobu hospodaření v dané lokalitě, kolísání koncentrací mohlo být výsledkem zornění lokality nebo osetím polí až na jaře (Kvítek a kol., 2001). Statistické charakteristiky měření koncentrace dusičnanů a jejich průběh ukazuje tabulka 4.10 a obrázky 4.19. - 4.22.

Fučík (2007) považuje koncentrace dusičnanů v drenážních a povrchových vodách za celé období sledování (1992-2004) za velmi vysoké. Podíl dusičnanů na celkovém

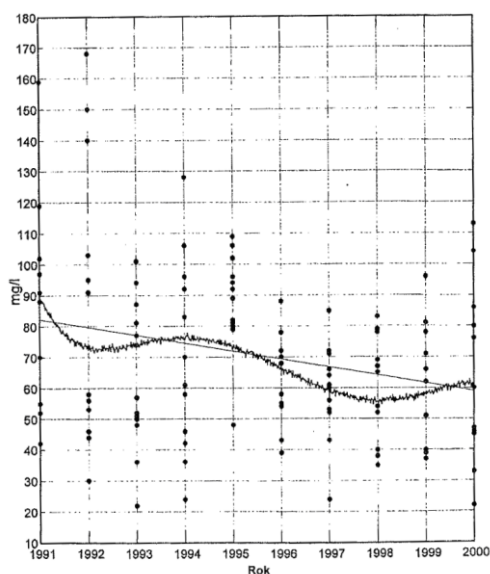
anorganickém dusíku v odběrných šachticích drenážních vod se pohyboval mezi 90 a 99 %. Charakteristické hodnoty C90 (hodnoty s 90% pravděpodobností nepřekročení) se v drenážních vodách pohybovaly mezi 64,6 - 93,8 mg.l⁻¹. Fučík (2007) si také povšimnul, že koncentrace dusičnanů rostou s průtokem. Specifické odnosy dusičnanů byly výrazně vyšší v letech s vyšší vodností. Tyto trendy jsou patrné jak v povrchových, tak v drenážních vodách.

Tabulka 4.10: Statistické charakteristiky koncentrací dusičnanového N v Černíči

Charakteristika	Černíči (1991-2000)
Průměr	70,65 mg NO ₃ .l ⁻¹
Medián	68,5 mg NO ₃ .l ⁻¹
Minimum	22 mg NO ₃ .l ⁻¹
Maximum	168 mg NO ₃ .l ⁻¹
Charakterická hodnota	102,5 mg NO ₃ .l ⁻¹
Třída jakosti dle ČSN 75 7221	V.

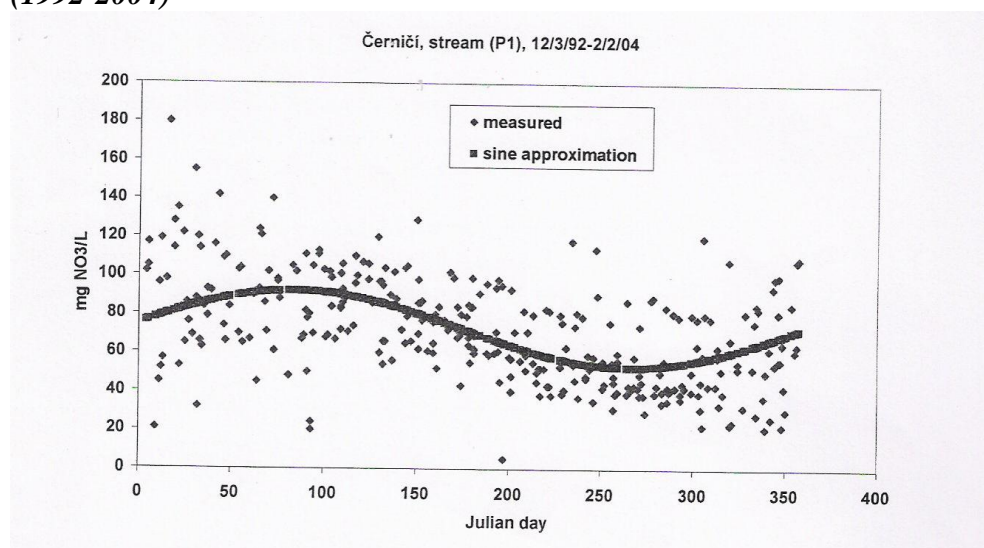
Zdroj: Kvítek a kol. (2001)

Obrázek 4.19: Lineární a nelineární aproximace meziročního chodu koncentrací dusičnanů (spojité čáry) vyhodnocená z průměrných měsíčních koncentrací dusičnanů (body), závěrový profil v Černíči (1991-2000).



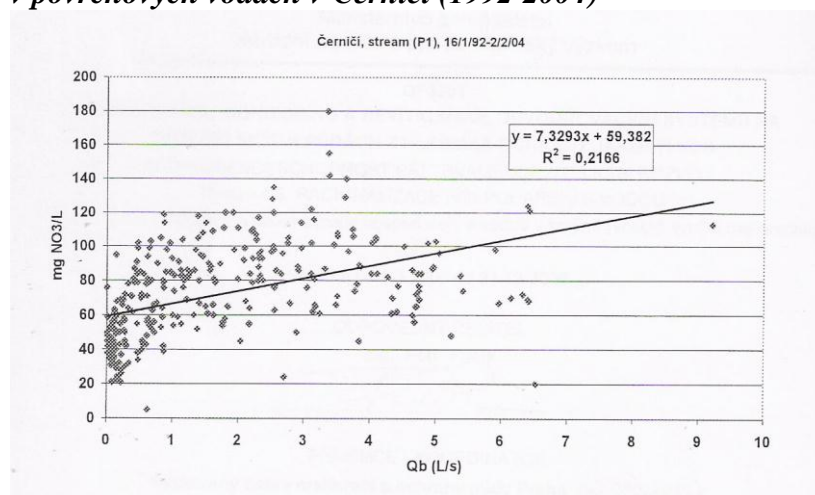
Zdroj: Kvítek a kol. (2001)

Obrázek 4.20: Sezónní chod koncentrací dusičnanů v povrchových vodách v Černíči: měřené hodnoty jsou vyznačeny body, křivka ukazuje sinusovou aproximaci hodnot (1992-2004)



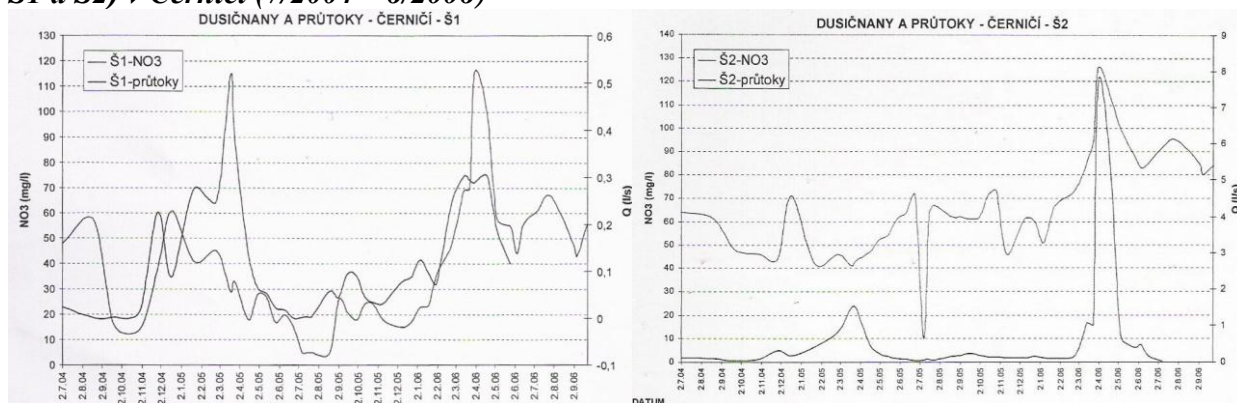
Zdroj: Fučík (2007)

Obrázek 4.21: Nelineární závislost mezi průtokem a koncentrací dusičnanů v povrchových vodách v Černíči (1992-2004)



Zdroj: Fučík (2007)

Obrázek 4.22: Chod koncentrací dusičnanů a průtoků v drenážních vodách (šachtice Š1 a Š2) v Černíči (7/2004 – 6/2006)



Zdroj: Fučík (2007)

4.2.4. Transport aniontů půdním profilem

Čížek (2001) prováděl v Černíči výzkum funkce půdních pórů a pohybu anionů půdním profilem kambizemě. Dynamika pohybu anionů byla charakterizována pomocí odběru vzorků drenážních a povrchových vod v týdenních intervalech. Jako nejvhodnější indikátory se ukázaly sezónní změny koncentrací nitrátů a síranů. Čížek (2001) si pro svůj výzkum povodí Černíči rozdělil na tři zóny: hydromorfní půdy v kambizemní oblasti, kambizem na orné půdě na svahovině ve vyšší poloze a mělké kolektory ve vyšších polohách.

Čížek (2001) uvedl, že směr pohybu půdních roztoků udává hladina podzemní vody. Nitráty v kambizemích s jemnými póry prosakují a nemohou vzlínat. Jsou vymývány zdola při stoupání a klesání hladiny podzemní vody. V kambizemích se širokými póry při nízké hladině podzemní vody půdní roztok obsahuje vysoké koncentrace síranových iontů a nízké koncentrace nitrátových iontů. Při zvednutí hladiny podzemní vody dochází ke zvýšení koncentrací nitrátových iontů a poklesu koncentrace síranových iontů. V hydromorfních kambizemích jsou tyto procesy méně zřetelné.

4.2.5. Eroze a odnos splavenin

V rámci experimentálních povodí spravovaných VÚMOP, označil Tippl (2001) povodí Černíči jako potenciálně nejvíce erozně ohrožené. V povodí aplikoval několik metod určení erozního ohrožení a transportu sedimentů: USLE, metodu čísel CN křivek pro odhad objemu odtoku a metodu výpočtu transportu splavenin vodním tokem MUSLE,

která je založená na univerzální rovnici ztráty půdy. Tippl (2001) rovněž odhadl pomocí vzorkovače transport splavenin při mimořádné odtokové události.

V Černíči byla odhadnuta pomocí USLE průměrná roční ztráta půdy vodní erozí. V rovnici byla počítána hodnota faktoru erozní účinnosti srážek $R = 20 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$, faktor vegetačního krytu $C = 0,2-0,3$, hodnoty L faktoru se pohybovaly v rozmezí $1,66 - 2,61$, faktor protierozních opatření nebyl uvažován ($P = 1$). Faktory sklonu svahu a erodovatelnosti půdy, které jsou relativně stabilní v čase, byly odhadnuty pomocí BPEJ. Výsledek, který je uvedený v tabulce 4.11, je udán za celá katastrální území Černíči a Křivsoudov.

Tabulka 4.11: Potenciální erozní ohroženost zemědělských půd v Černíči podle USLE

Katastrální území	Koeficient ohrožení katastrálního území	Průměrný stupeň ohrožení povodí	Orientační potenciální ztráta půdy v povodí ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$)
Černíči	0,46 – 0,6	Ohrožené	4,5 – 6
Křivsoudov	0,46 – 0,6	Ohrožené	4,5 - 6

Zdroj: Tippl (2001)

Odhad kulminačního odtoku byl proveden podle metody čísel odtokových křivek a odnos sedimentů pomocí rovnice MUSLE (tab. 4.12). Základním vstupem je srážkový úhrn, o němž se předpokládá, že je stejnoměrně rozdělen na ploše povodí. Tippl (2001) zvolil jako návrhový déšť 24 hodinový déšť s pravděpodobností opakování jednou za 10 let.

Tabulka 4.12: Odhad kulminačního průtoku a transportu splavenin při desetiletém dešti v Černíči

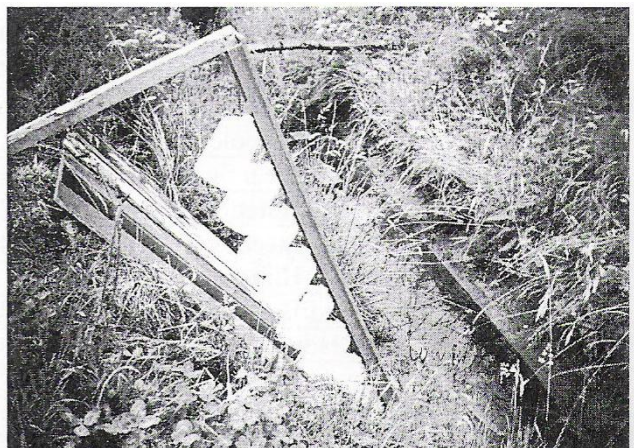
Převažující kultura	Objem přímého odtoku (m^3)	Kulminační průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Transport splavenin z celého povodí (t)	Transport splavenin z jednotky plochy zemědělské půdy ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$)
Kukuřice	34652	4,1	2535	22

Zdroj: Tippl (2001)

Tippl (2001) uvádí příklad hodnot naměřených pomocí jednoduchého vzorkovače (obr. 4.23) v Černíči a výpočet odnosu plavenin (tab. 4.13). Jeho nedostatkem je, že umožňuje odběr vzorků jen během vzestupné fáze povodňové vlny. Průtok $4,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, při kterém bylo odebráno 9 vzorků, byl způsoben přívalovým deštěm v noci z 5. 5. na 6. 5. 2001. Déšť měl maximální intenzitu $12,8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ a celkový srážkový úhrn $27,7 \text{ mm}$. V povodí byla v roce 2001 hojně zaseta kukuřice, což způsobilo rychlý povrchový

odtok, extrémní průtok v závěrovém profilu (došlo k vybředení toku), vysoké koncentrace nerozpuštěných látek a značný odnos sedimentu z povodí.

Obrázek 4.23: Jednoduchý vzorkovač instalovaný nad závěrovým profilem v Černíči.



Nosná deska s lahvemi, které jsou běžně uloženy v rýze v boku koryta, je za účelem fotografování nadzvednuta.

Zdroj: Tippl (2001)

Tabulka 4.13: Koncentrace a odnos nerozpuštěných látek během přívalového deště 5.5. -6. 5. 2001 v Černíči

Pořadí odběru	Střední průtok Q ($l.s^{-1}$)	Doba trvání průtoku (min)	Koncentrace nerozpuštěných látek ($mg.l^{-1}$)	Odnos celkem z povodí (kg)	Odnos z 1 ha plochy povodí (kg)	Odnos z 1 ha zemědělské půdy (kg)
2	19	40	72155	3290	23	29
3	62	20	170255	12728	88	111
4	137	20	287900	47434	327	412
5	254	20	286045	87084	601	757
6	392	20	207164	97450	672	847
7	588	20	190745	134521	928	1170
8	842	20	85991	86875	599	755
9	2250	30	244509	990261	6829	8611
Celkem		190		1 459 644	10 067	12 693

Zdroj: Tippl (2001)

V rámci výzkumu eroze v Černíči bylo prováděno hodnocení vlivu zemědělského hospodaření na kvalitu vody a množství erozních smyvů. Základem pro analýzu byly pravidelně odebírané vzorky v závěrovém profilu.

Erozi půdy způsobují především přívalové deště nebo na jaře náhlé tání sněhu, které mají převážně lokální charakter a projevují se nejzřetelněji v malých povodích (Janeček, 2004). Během zvýšených odtoků způsobených přívalovými dešti nebo táním sněhu bylo hodnocení obsahu nerozpuštěných látek ve vodě možné díky odebírání vzorků v různých fázích povodňové vlny pomocí vzorkovače. Výsledky těchto odběrů jsou shrnuty v tabulkách 4.14 a 4.15.

Tabulka 4.14: Přehled zvýšených odtoků a odnosu nerozpuštěných látek během přívalemých srážek

Datum	Max. intenzita deště (mm.min ⁻¹)	Doba trvání vzestupné fáze vlny (min.)	Úhrn srážek (mm)	Odnos nerozpuštěných látek celkem z povodí (kg)	Odnos nerozpuštěných látek z 1 ha plochy povodí (kg)	Odnos nerozpuštěných látek z 1 ha zemědělské půdy (kg)	Způsob osetí	Závažnost škody
30.5. 1995	0,18	120	18,5	148 690	1 047	1 293	Horní část povodí oseta brambory a kukuřicí, žádná protierozní opatření	Vysoká koncentrace odnášených jemných částic
6.6. 1995	0,1	285	11,5	17 775	125	155	dtto	Vysoká koncentrace větších zrnitostních frakcí, erozní rýhy v porostech kukuřice
21.6. 1995	0,25		5				dtto	Značně zanesené koryto, částice vyšších frakcí
22. 7. 1995	0,33	150	10	10 684	74	93	dtto	
4. 5. 1996	0,07	420	9,1	995	7	9		
13. 6. 1996	0,1	45	12,3	1 669	11	15		
16.- 17. 6. 1999	0,45	120	25,3	26 331	182	229		
6.7. 1999	0,25	120	25,4	2 535	17	22		Nižší intenzita při stejném úhrnu způsobila nižší odnos částic

14.6. 2000	0,1	60	16,3	3 638	25	32	Úzkořádkové plodiny	Malý
24.7. 2000	0,09	75	53,6	1 092	8	10		
5.- 6.5. 2001	0,5	190	40,3	1 459 644	10 067	12 693	Kukuřice pěstovaná bez aplikace protierozních opatření	Výrazný
22.6. 2001	0,08	65	10,1	25 316	175	220	Kukuřice	
1.7. 2001	0,05	60	7,7	10 645	73	93		

*) v následujících letech nebyl zaznamenán žádný průtok způsobený přívalovými srážkami: 1992, 1993, 1994, 1997, 1998

Zdroj: Janeček (2004)

Tabulka 4.15: Přehled zvýšených odtoků způsobených táním sněhu (1993-2001)

Datum	Doba trvání průtoků (min.)	Odnos celkem z povodí (kg)	Odnos z 1 ha plochy povodí (kg)	Odnos z 1 ha zemědělské půdy (kg)	Způsob osetí	Závažnost škody
16. 3. 1993	360	11 610	82	101		Koncentrace nerozpuštěných látek nízká, výsledný transport látek není vysoký
1.3. -2. 3. 1999	1 920	10 891	75	95	Ozimé plodiny	Transport sedimentů z povodí nebyl vysoký
29. -30. 1. 2000	1 165	972	6	9	80% orné půdy zasety ozimé plodiny	Nízké koncentrace nerozpuštěných látek

Zdroj: Janeček (2004)

V tabulce 4.16 jsou uvedeny hodnoty odnosu nerozpuštěných látek z pravidelně odebíraných vzorků s údaji ze vzorků automaticky odebíraných vzorkovačem. V letech, v kterých se vyskytla povodňová vlna, je patrný velký rozdíl mezi hodnotami vypočtenými z pravidelně odebíraných vzorků a hodnotami doplněnými o údaje ze vzorků automaticky odebraných při zvýšených průtocích vzorkovačem. Výrazně se na erozi a transport nerozpuštěných látek v povodí projevuje vliv druhu pěstovaných plodin na jednotlivých pozemcích povodí. Protože se povodí nachází ve 3. ochranném pásmu vodárenského zdroje, projevil se značný transport nerozpuštěných látek na kvalitě vody v nádrži.

Tabulka 4.16: *Odnos nerozpuštěných látek ze zemědělské půdy v Černíči v kg.ha⁻¹.rok⁻¹*

Rok	Odnos vypočtený pouze z pravidelně odebíraných vzorků (kg.ha ⁻¹ .rok ⁻¹)	Odnos sedimentu vypočtený ze vzorků odebraných vzorkovačem a pravidelně odebíraných vzorků (kg.ha ⁻¹ .rok ⁻¹)
1992	15,5	15,5
1993	4,1	105,2
1994	9,1	9,1
1995	9,5	1 541
1996	5,4	24
1997	10,3	10,3
1998	3,5	3,5
1999	3,1	346
2000	8,6	51
2001	12,3	13 006
Celkem	81,4	15 111,6
Průměrně rok	8,1	1 511

Zdroj: Janeček (2004)

Tippl a kol. (2008) prováděl v Černíči experimentální měření rozsahu erozních procesů na půdách s porosty kukuřice. Důraz kladl na hodnocení rozdílu erozního smyvu při různém způsobu osetí, různých intenzitách dešťů a sklonech pozemků. Současně měřil vlhkost půdy před zamokřením. Při experimentu byl použit mobilní simulátor deště s pokrytím 30 m².

Výsledky (tab. 4.17) ukázaly, že největší povrchový odtok a erozní smyv se vyskytují při tradičním pěstování kukuřice po spádnicí i po vrstevnici. Jako účinnou protierozní ochranu označil pěstování kukuřice zároveň s ozimým žitem jako podplodinou.

Tabulka 4.17: Experimentální měření smyvu půdy v Černíči při porostu kukuřice na pozemku s lehčí až středně těžkou půdou

Vlastnosti půdy	Setí po spádnicí	Setí po vrstevnici	Setí do strniště po žitě (po nakypření)	
			Před zamokřením	Po zamokření
Sklon [°]	6	6	4	4
Vlhkost půdy před / po zamokření [%]	9,6 / 19,6	9,6 / 20,7	10,5 / 19,8	14,3 / 34,2
Výška srážky [mm]	11,22	6,9	10	16,1
Intenzita srážky [mm.min ⁻¹]	0,61	0,46	0,48	0,78
Výška odtoku [mm]	3,75	1,65	0,35	0,5
Však [mm]	7,47	5,24	9,7	15,6
Intenzita vsaku [mm.min ⁻¹]	0,37	0,26	0,48	0,78
Smyv [t.ha ⁻¹]	0,9	0,14	0,03	0,01
Začátek povrchového odtoku	1 min 20 s	3 min	4 min	7 min 50 s

Zdroj: Tippl a kol. (2008)

4.2.6. Aplikace hydrologického modelu KINFIL

Na příkladu události z 5. května 2001 byla provedena analýza a rekonstrukce povodňové události za pomoci srážko-odtokového modelu KINFIL (Kovář a kol., 2004). Model byl na základě této události kalibrován a použit pro simulaci scénáře povodňových odtoků z N-letých návrhových dešťů N=10 let a N=50 let a délce trvání 20 -120 minut.

Z výsledků analýzy vyplynulo, že z povodňového hlediska nejnebezpečnější doba trvání deště pro obě periodicity výskytu je 40 minut, což odpovídá době koncentrace zjištěné podle Janečka a kol. (1992).

4.2.7. Rozsah a funkce zemědělských odvodňovacích systémů

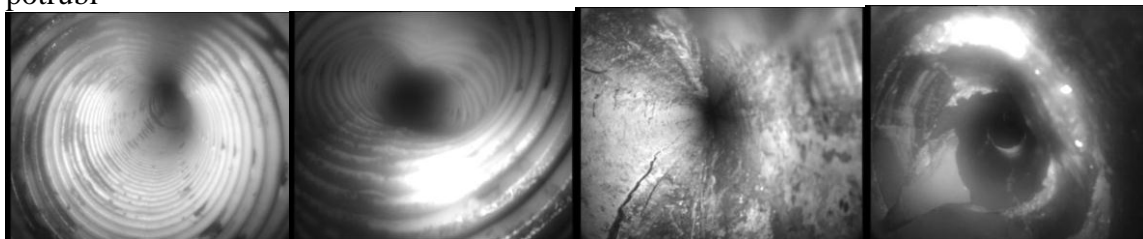
Sledování odvodňovacích systémů tvoří těžiště současného výzkumu v Černíči. Dlouhodobě jsou sledovány odtokové výšky v drenážních šachticích Š1 a Š2 a kvalita vody. Umístění šachtic je patrné z obrázku 4.16. V minulosti byla v rámci projektu *Racionalizace využívání, údržby a oprav odvodňovacích staveb* (Kulhavý, 2005) v Černíči například aplikována metodika identifikace liniových prvků drenážních systémů pomocí DPZ nebo sledován vláhový režim půd v drenážních rýhách. Kulhavý (2006) se zaměřil na sledování hydroekologických funkcí existujících odvodňovacích systémů za účelem získání kvalitativního a kvantitativního náhledu na vnitřní

mechanismy tvorby odtoku a jakosti vody v podmínkách podhorských oblastí krystalinika Českomoravské vrchoviny.

V roce 2005 byl prováděn v povodí videomonitoring současného stavu odvodňovacího potrubí. Snímky pořízené inspekčním kamerovým systémem ROCAM ukázaly četná mechanická poškození. Jednalo se například o promáčknutí potrubí, praskliny na stěnách potrubí, vtoky vody a nánosy sedimentů na jeho stěnách. V potrubí byla dále zaznamenána přítomnost živých organismů např. komárů. Příklady snímků pořízených v podzemí jsou na obrázku 4.24 (VÚMOP, 2009).

Obrázek 4.24: Snímky pořízené při monitoringu současného stavu odvodňovacího potrubí

a. neporušený stav b. promáčknutí potrubí c. praskliny d. porušený stav potrubí

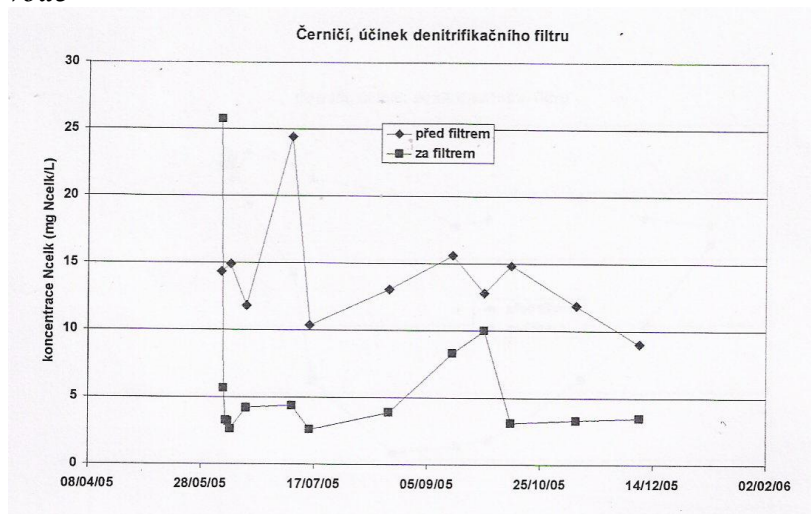


Zdroj: VÚMOP (2009)

Kapitola 4.2.3., která se věnovala kvalitě vody v Černíči, poukázala na problém dusičnanového znečištění drenážních vod. V roce 2005 byla v zájmovém povodí provedena experimentální instalace denitrifikačního filtru, který pracuje na principu biochemické redukce. Výsledkem procesu je plynný dusík, oxidy dusíku a čpavek. Denitrifikační filtr byl tvořen balíky lisované slámy o rozměrech 13 x 1,2 x 0,7 m, které byly umístěny vedle drenážní šachtice a zakryty zeminou. Voda je do filtru přiváděna potrubím a odváděna do potoka. Jednou měsíčně je vyhodnocena kvalita vody na přítoku a na výtoku z filtru.

Výsledky ukázaly, že dusičnany ve vodě vytékající z filtru byly úplně odbourány. Jak je patrné z obrázku 4.25, obsah celkového dusíku se snížil na třetinu. Obsah celkového fosforu se na výtoku dočasně několikanásobně zvýšil, ale asi čtyři měsíce po instalaci filtru se jeho hodnota srovnala s obsahem ve vstupu. Acidita a pH nejprve vzrostly, přibližně po 6 měsících se dostaly hodnoty na úroveň v přítoku. Obsah síranů a elektrická vodivost nebyly filtrem ovlivněny vůbec.

Obrázek 4.25: Vliv denitrifikačního filtru na koncentraci celkového N v drenážní vodě



Zdroj: Kulhavý (2006)

5. Srážkové a odtokové charakteristiky

Následující kapitola je členěna do tří tematických celků. Nejprve je věnována pozornost dlouhodobým srážkovým a odtokovým charakteristikám. Poslední část je věnována analýze mimořádných událostí.

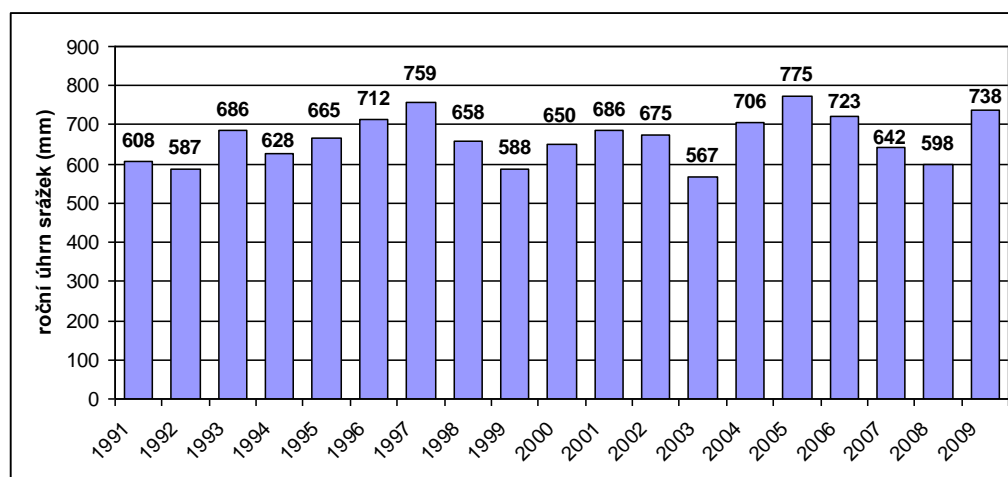
5.1. Srážkové charakteristiky

Srážkové charakteristiky v zájmovém povodí jsou hodnoceny na základě dat o denních srážkových úhrnech za období 2000-2009 a o ročních srážkových úhrnech 1991-2000. V letech 1991-1998 pobíhalo měření v nedalekých Čechticích, od roku 1998 je srážkoměr umístěn v závěrové části výzkumného povodí. Za měřené období nastaly výpadky v měření srážek: 1. 11. 1994 - 26. 4. 1995, 27. 10. 1995 - 31. 10. 1995, 24. -31. 1. 2006 a 27.5. -1. 6. 2008. Hodnota ročního úhrnu srážek byla v roce 1995 nahrazena dlouhodobým průměrem. V letech 2006 a 2008 byla data doplněna plošnými radarovými odhady 24hodinových srážek poskytnutými ČHMÚ.

5.1.1. Roční úhrny srážek

Průměrný roční úhrn srážek H_a v zájmovém povodí za období 1991 - 2009 je 665 mm. Maximální roční srážkový úhrn H_{max} se vyskytl v roce 2005, dosáhl 775 mm. Minimální roční srážkový úhrn H_{min} se vyskytl v roce 2003, dosáhl 567,2 mm. Roční úhrny v průběhu období 1991-2009 jsou čitelné z grafu 5.1.

Variační rozpětí průměrných ročních úhrnů je 207,8 mm. Variační koeficient, který vyjadřuje nerovnoměrnost rozložení srážek v průběhu jednotlivých let, je 8,6 %. Souhrn statistických charakteristik datového souboru je uveden v tabulce 5.1.

Graf 5.1: Roční úhrny srážek v Černíči (1991-2009)

Zdroj: výpočet na základě dat VÚMOP

Tabulka 5.1: Charakteristika ročních srážkových úhrnů v Černíči (1991 - 2009)

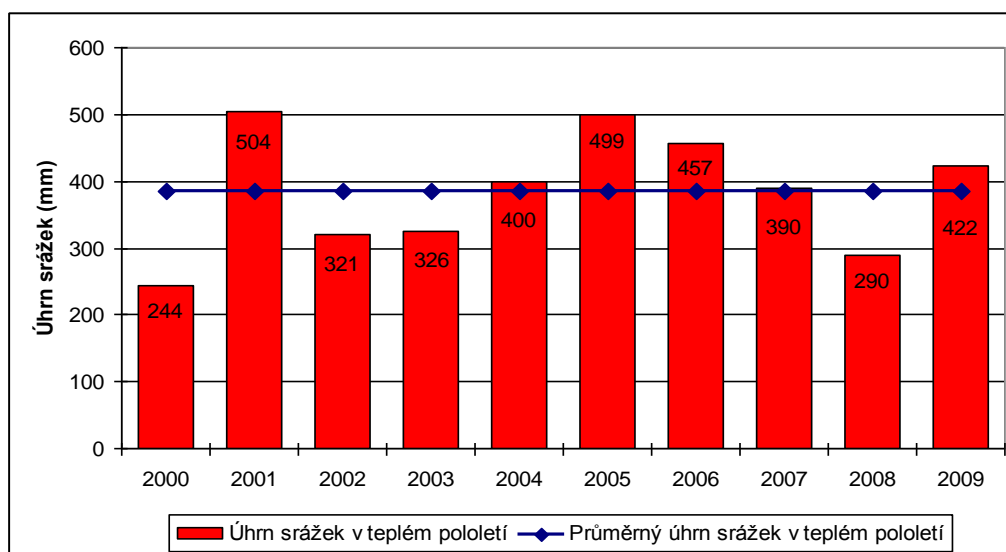
Statistická charakteristika	Hodnota
Průměrný roční srážkový úhrn H_a	665 mm
Maximální roční srážkový úhrn $H_{a_{max}}$	775 mm
Minimální roční srážkový úhrn $H_{a_{min}}$	567,2 mm
Variační rozpětí $H_{a_{max}} - H_{a_{min}}$	207,8 mm
Směrodatná odchylka δ	59 mm
Variační koeficient V_{ka}	8,8 %

Zdroj: výpočet na základě dat VÚMOP

5.1.2. Sezónní a měsíční úhrny srážek

Roční úhrn srážek lze rozložit na úhrn za teplé a chladné pololetí (vegetační a mimovegetační období), na roční období a na jednotlivé měsíce.

Teplé pololetí – vegetační období trvá na severní polokouli od 1. dubna do 30. září, chladné od 1. října do 31. března (Sobiček a kol., 1993). Srážkový úhrn v teplém pololetí (tab. 5.2) se pohybuje od 243,8 mm (2000) do 503,8 mm (2001). Průměrná hodnota úhrnů v teplém pololetí je 385,3 mm, kdy v Černíči spadne průměrně 57 % ročního úhrnu srážek. Naopak na studené pololetí připadá průměrně 43 % ročního úhrnu, tj. 290,9 mm srážek. Srážkový úhrn v chladném pololetí se pohybuje od 182,2 mm (2001) do 405,8 mm (2000). Hodnoty úhrnů v teplém pololetí v jednotlivých letech je uveden v grafu 5.2.

Graf 5.2: Úhrn srážek v teplém pololetí v Černíči (2000-2009)

Zdroj: výpočet na základě dat VÚMOP

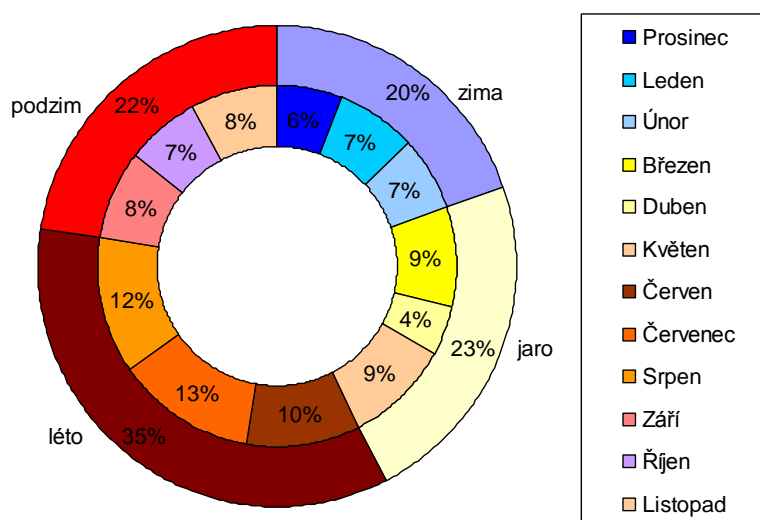
Tabulka 5.2: Charakteristika srážkových úhrnů v letním pololetí (2000-2009)

Statistická charakteristika	Hodnota
Průměrný úhrn srážek H_{ss}	385,3 mm
Maximální úhrn srážek $H_{s_{max}}$	503,8 mm
Minimální úhrn srážek $H_{s_{min}}$	243,8 mm
Variační rozpětí $H_{s_{max}}-H_{s_{min}}$	260 mm
Směrodatná odchylka δ_s	84 mm
Variační koeficient V_{ks}	21,7 %

Zdroj: výpočet na základě dat v VÚMOP

Meteorologický slovník (Sobíček a kol., 1993) rozděluje rok na čtyři roční období: jaro - březen, duben květen; léto - červen, červenec, srpen; podzim – září, říjen, listopad; zima - prosinec, leden, únor.

Průměrný letní úhrn se pohybuje mezi 343,3 mm (rok 2005) a 165,3 mm (rok 2008). Na ročním úhrnu se nejvíce podílí léto (35,1 %), v pořadí druhým ročním obdobím je jaro (22,6 %) s průměrným úhrnem 153,1 mm. Následuje podzim s 22,4 % (152 mm) a zima s 19,7 % (133,5 mm).

Graf 5.3: Rozložení sezónních a měsíčních úhrnů během roku (průměr 2000-2009)

Zdroj: výpočet na základě dat VÚMOP

Tabulka 5.3: Rozložení měsíčních úhrnů během roku (2000-2009)

Měsíc	Průměrný úhrn srážek (mm)	Podíl na ročním úhrnu (%)	Variační rozpětí (mm)	Variační koeficient (%)
Listopad	53,3	7,9	89,8	50,2
Prosinec	39,1	5,8	55,0	44,8
Leden	49,5	7,3	68,3	41,4
Únor	44,9	6,6	70,0	47,3
Březen	60,1	8,9	132,1	55,5
Duben	30,4	4,4	82,4	76,0
Květen	62,6	9,3	85,4	43,9
Červen	70,4	10,4	117,7	56,6
Červenec	83,8	12,6	152,0	46,8
Srpen	83,4	12,3	123,8	45,7
Září	54,7	8,1	107,0	61,6
Říjen	44,0	6,5	72,4	51,1

Zdroj: výpočet na základě dat VÚMOP

Průměrné hodnoty měsíčních úhrnů se pohybují mezi 83,8 mm (červenec) a 30,4 mm (duben). Nejvíce srážek spadne v letních měsících červenci 13 % a srpnu 12 % průměrného ročního úhrnu, naopak nejmenší podíl 4 % připadá na duben (graf 5.3). Nejvyšší měsíční úhrn byl naměřen v červenci 2005 167,1 mm.

Největší rozkolísanost vykazuje měsíc duben s variačním koeficientem $V_k = 76 \%$, dále měsíce září a červen. Velké hodnotě variačního koeficientu také odpovídá rozdíl mezi maximálním a minimálním průměrným měsíčním úhrnem daného měsíce. Naopak

nejmenší rozkolísanost vykazuje měsíc leden $V_k = 41,4$ %. Poměrně vysoké hodnoty variačních koeficientů jsou dány krátkým hodnoceným obdobím.

Tabulka 5.3 uvádí průměrné hodnoty měsíčních úhrnů, podíl jednotlivých měsíců na ročním úhrnu srážek, rozkolísanost měsíčních úhrnů – variační koeficient V_k .

5.1.3. Denní úhrny srážek

Množství spadlých srážek se udává výškou, do které by sahala srážková voda na rovném zemském povrchu, kdyby ani neodtékala, ani se neodpařovala a nevsakovala do země. Výška spadlé vody, kdy se mluví o dni s deštěm, je 0,1 mm. Menší množství se zaznamenává jako den beze srážek. Pro klimatologické účely se množství srážek měří jednou denně v 7 hodin ráno s přesností na 1 desetinu mm (Straková, 1999).

Část práce je věnována mimořádným srážko-odtokovým událostem. Pro představu o počtu srážkových dní, které se na vzniku mimořádných stavů podílejí, jsem vyčíslila počet srážkových dní v roce s hodnotami denních srážkových úhrnů v pěti intervalech 0,1 – 1 mm; 1,01 – 2 mm; 2,01 – 5 mm; 5,01 – 10 mm; 10,01 – 20 mm a více než 20 mm. Vyhodnocení uvedené v tabulce 5.4 udává přehled podílů dní s určitým srážkovým úhrnem na celkové délce sledovaného období a na teplém pololetí.

Tabulka 5.4: Počet dní s určitou hodnotou denního úhrnu srážek (2000-2009)

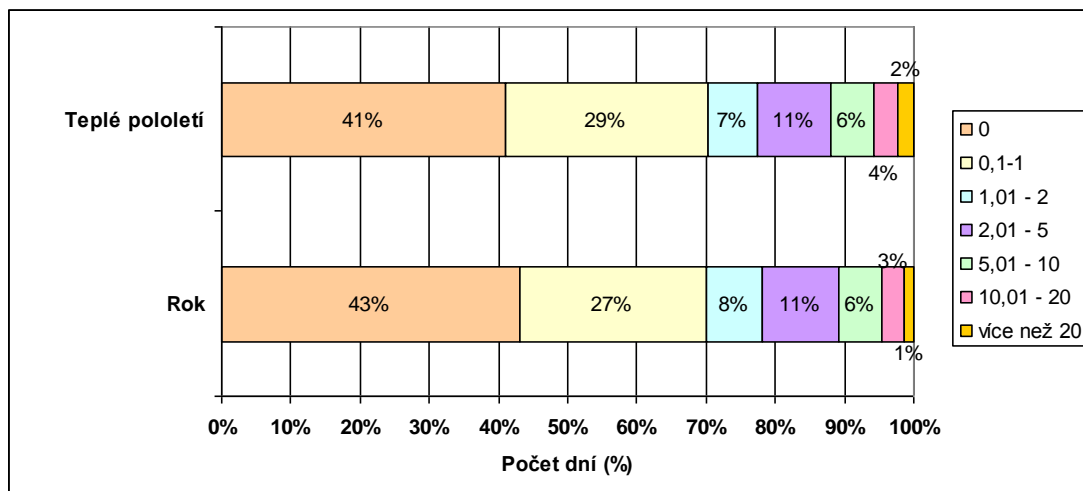
Denní srážkový úhrn	Roční průměr (v %)	Teplé pololetí (v %)
Dny bez srážek	43,2	40,9
0,1 – 1 mm	27,0	29,4
1,01 – 2 mm	8	7
2,01 – 5 mm	11,2	10,7
5,01 – 10 mm	6,2	6,2
10,01 – 20 mm	3,3	3,6
Více než 20 mm	1,3	2,2

Zdroj: výpočet na základě dat VÚMOP

Nejvyšší podíl výšek denních úhrnů na ročním úhrnu je v nejnižším intervalu, za 27 % dnů spadlo 0,1-1 mm srážek. Mimořádné úhrny s výškou více než 20mm se vyskytly pouze v průměru jen v 1,3% dnech tj. ve 47 dnech za celé hodnocené období (graf 5.4). V letním pololetí se vyskytuje relativně méně dnů bez srážek, naopak se vyskytuje více srážkových dnů s úhrnem vyšším než 20 mm, 2,2 % dní, tj. 40 dnů za hodnocené

období. Přehled dnů s úhrnem vyšším než 20 mm v letním půlroce je uveden v tabulce 5.5.

Graf 5.4: Počet dní s určitou hodnotou denního úhrnu srážek (2000-2009)



Zdroj: výpočet na základě dat VÚMOP

Tabulka 5.5: Denní úhrny vyšší než 20 mm v teplém pololetí (2000-2009)

Datum	Denní úhrn srážek (mm)	Datum	Denní úhrn srážek (mm)
24. 7. 2000	53,6	5. 7. 2005	23,7
6. 5. 2001	45,3	8. 7. 2005	21,4
20. 7. 2001	32,2	30. 7. 2005	53,8
31. 8. 2001	21,4	15. 8. 2005	40,1
16. 7. 2002	33,2	21. 8. 2005	24,9
11. 8. 2002	27,3	12. 9. 2005	24
12. 8. 2002	42,8	12. 4. 2006	21,4
13. 8. 2002	25,5	16. 5. 2006	21,6
31. 8. 2002	20,9	27. 5. 2006	27
9. 5. 2003	24,1	29. 6. 2006	70,7
10. 5. 2003	23,8	6. 8. 2006	25,4
5. 6. 2003	20,1	17. 7. 2007	20,7
2. 7. 2003	20,6	19. 7. 2007	33,3
18. 8. 2003	23,9	23. 8. 2007	34,8
2. 6. 2004	51,4	5. 9. 2007	22,5
8. 7. 2004	32,7	6. 9. 2007	28
22. 9. 2004	24,5	15. 8. 2008	20,7
23. 9. 2004	28,0	29. 6. 2009	23
23. 5. 2005	34,3	19. 7. 2009	27
30. 6. 2005	22,7	2. 8. 2009	52,5

Zdroj: VÚMOP

Z dat uvedených v tabulce 5.5 je zřejmé, že nejvíce dní s úhrnem vyšším než 20 mm nastalo v měsících červenci, 12 dnů, a srpnu, 12 dnů. V ostatních měsících se vyskytl nižší počet dnů s úhrnem vyšším než 20 mm, v květnu 6 dnů, v červnu 4 dny, v září 5 dní. Nejméně dnů s mimořádným úhrnem se vyskytlo v dubnu, 1 den. Průměrně se ročně vyskytnou v Černíči 4 dny s úhrnem vyšším než 20 mm. Nejvíce takových dnů, celkem 8, nastalo v roce 2005, tedy v srážkově nejbohatším pozorovaném roce. Naopak v letech 2000 a 2008 se vyskytl pouze 1 takový den. Nejvyšší denní úhrn byl naměřen 29. 6. 2006 70,7 mm. V srpnu 2002 nastaly 3 dny s extrémním úhrnem po sobě, během kterých spadlo v povodí 95,6 mm dešťových srážek.

5.2. Odtokové poměry

Pro charakteristiku odtoku jsou použita data průměrných denních průtoků poskytnutá VÚMOP z limnigrafické stanice umístěné v závěrové části profilu povodí Černíči za desetileté období 2000-2009. V měření byly zaznamenány během sledovaného období dva výpadky: 7. - 14. 10. 2002 a 30. 7. - 4. 8. 2005. Chybějící data byla doplněna výpočty VÚMOP.

5.2.1. Odtokové charakteristiky

Průtokem se nazývá množství vody, které proteče měrným profilem za jednu sekundu. Vzhledem k malé rozloze zájmového území je průtok Q uváděn v $l.s^{-1}$. Dlouhodobý průměrný průtok Q_a pro stanici Černíči je $6,48 l.s^{-1}$.

Objem odtoku O_a , tedy celkové množství vody, které odteklo z povodí korytem vodního toku za rok, je $204\,242,9 m^3$. Hodnotu jsem získala vynásobením dlouhodobého průměrného průtoku počtem sekund v roce.

Specifický odtok q_a představuje množství vody, které odeče za jednotku času z jednotky plochy povodí $q_a = Q_a \cdot P^{-1} [l.s^{-1}.km^{-2}]$. V Černíči dosahuje specifický odtok hodnoty $4,83 l.s^{-1}. km^{-2}$.

Vrstva vody rovnoměrně rozložená na ploše povodí, jež odeče za jednotku času, se nazývá odtoková výška H_o . Roční odtoková výška je dána vztahem objemu odtoku za rok a plochy povodí $H_{oa} = O_a \cdot P^{-1} \cdot 10^{-3} [mm]$, v Černíči $H_{oa} = 152,42 mm$.

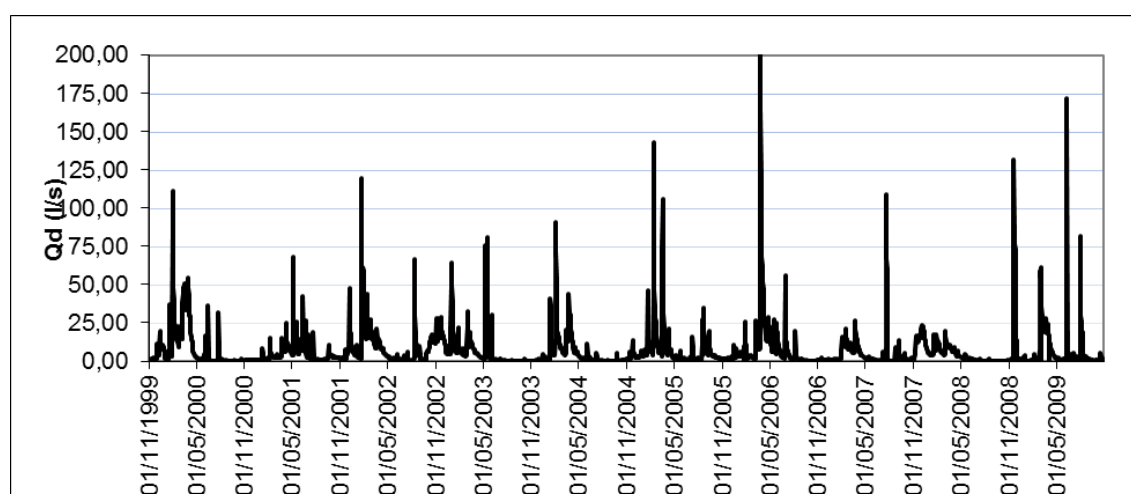
Odtokový součinitel charakterizuje podíl povrchového odtoku z povodí na celkovém množství spadlých srážek. Jeho hodnota se získá podílem odtokové výšky H_{oa} a

průměrného ročního úhrnu srážek H_a , $\varphi = H_{oa} \cdot H_a^{-1}$. Z povodí Černíčí odtéklo korytem potoka průměrně 22,5 % srážkového úhrnu.

5.2.2. Denní průtoky

Průměrný denní průtok Q_d je vysoce proměnlivá hodnota, která se odvíjí od chodu srážek. Hodnoty okamžitých průtoků z povodí malých rozměrů reagují velmi rychle na srážky. Graf 5.5 slouží k představě o jejich dlouhodobém chodu.

Graf 5.5: Průměrné denní průtoky v Černíčí (2000-2009)



Zdroj: VÚMOP

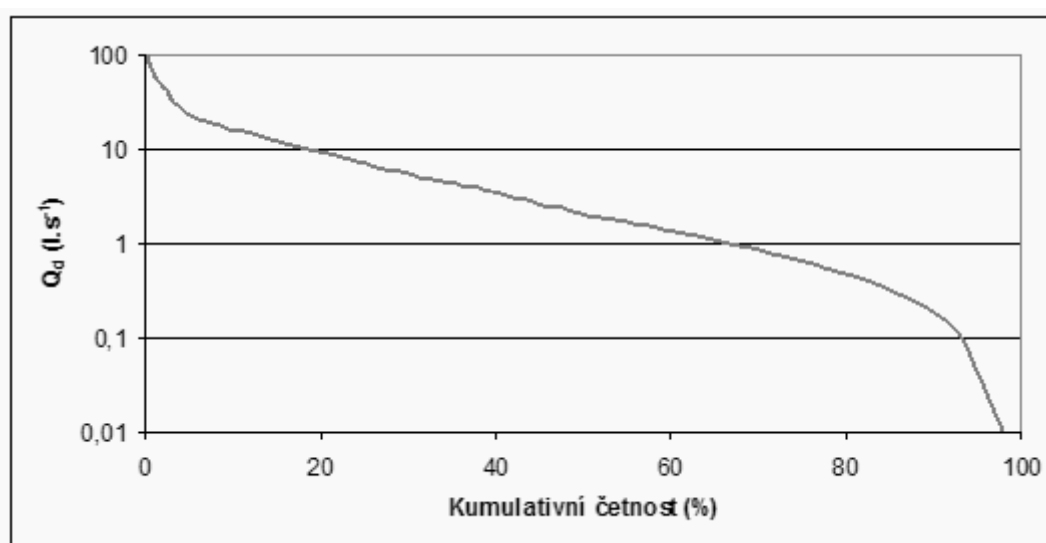
Denní průtoky (tab. 5.6) jsou značně rozkolísané, vyšších hodnot dosahují na jaře kvůli tání sněhu a v létě obzvláště kvůli výskytu vydatných přivalových srážek. Pozorované maximum průměrných denních průtoků činí 200 l.s^{-1} , které nastalo 27. 3. 2006. V suchých obdobích, v dlouhodobém průměru až ve 2 % sledovaných dnů, klesl průtok i na 0 l.s^{-1} .

O rozkolísanosti průměrných denních průtoků svědčí i graf 5.6 čáry překročení dlouhodobých průměrných denních průtoků, který vyjadřuje závislost mezi hodnotami průtoků a relativní kumulativní četností jejich výskytu tj. počtem dosažení těchto hodnot za sledované období 2000-2009. Tabulka 5.7 uvádí průměrný denní průtok dosažený v p % počtu dnů v období 2000-2009, které byly určeny z čáry překročení průtoků.

Tabulka 5.6: Charakteristika denních průtoků (2000-2009)

Statistická charakteristika	Hodnota
Průměrný denní průtok Q_d	$6,48 \text{ l.s}^{-1}$
Maximální denní průtok Q_{dmax}	200 l.s^{-1}
Minimální denní průtok Q_{dmin}	0 l.s^{-1}
Variační rozpětí $Q_{dmax} - Q_{dmin}$	$200,4 \text{ l.s}^{-1}$
Směrodatná odchylka δ_d	$12,8 \text{ l.s}^{-1}$
Variační koeficient C_{vd}	198,1 %
Medián	$2,1 \text{ l.s}^{-1}$

Zdroj: výpočet na základě dat VÚMOP

Graf 5.6: Čára překročení dlouhodobých průměrných denních průtoků (2000-2009)

Zdroj: výpočet na základě dat VÚMOP

Tabulka 5.7: P-procentní denní průtok (2000-2009)

Pravděpodobnost překročení (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Denní průtok (l.s^{-1})	16	9,5	5,5	3,5	2,1	1,35	0,85	0,43	0,13	0

Zdroj: výpočet na základě dat VÚMOP

5.2.3. Měsíční průtoky

Průměrné měsíční průtoky Q_m charakterizují rozložení odtoku během roku. Chod měsíčních průtoků je dán především klimatickými podmínkami, především množstvím srážek a teplotou vzduchu. Tání sněhové pokrývky má za následek zvýšení průtoků

v jarních měsících. Naopak v suchých podzimních měsících dochází k vyschnutí koryta a jsou zaznamenávány i nulové průtoky.

Tabulka 5.8 uvádí hodnoty průměrných měsíčních průtoků, podíl jednotlivých měsíců na celkovém ročním odtoku a statistické charakteristiky datového souboru během období 2000-2009.

Tabulka 5.8: Charakteristiky měsíčních průtoků v Černíči (2000-2009)

Měsíc	Průměrný měsíční průtok $Q_m (l.s^{-1})$	Variační rozpětí $(l.s^{-1})$	Variační koeficient $C_{vm} (%)$	Průměrný měsíční objem odtoku O_m (m^3)	Podíl O_m na $O_a (%)$
Listopad	7,4	33,6	140,5	19 287	8,8
Prosinec	5,2	13,0	85,7	14 035	6,4
Leden	8,3	22,2	78,5	22 169	10,1
Únor	12,0	20,2	65,9	29 086	13,2
Březen	22,9	72,8	89,3	61 301	27,9
Duben	9,6	26,4	76	24 922	11,3
Květen	4,8	12,7	98,8	12 862	5,9
Červen	4,1	11,6	101	10 529	4,8
Červenec	3,0	12,7	122,9	7 931	3,6
Srpen	3,3	11,3	127	8 713	4,0
Září	1,3	3,3	96	3 297	1,5
Říjen	2,1	12,1	165,6	5 587	2,5
Roční průměr	6,48	-	-	2,042.10⁵	

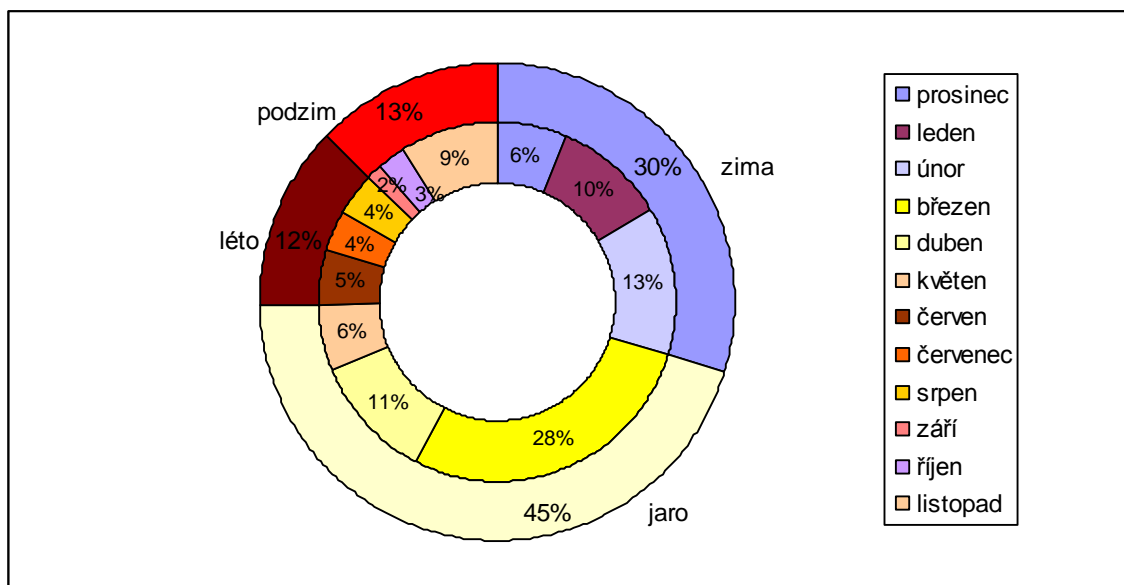
Zdroj: výpočet na základě dat VÚMOP

Nejvyšší průměrné měsíční průtoky se z dlouhodobého hlediska vyskytují v měsíci v březnu $22,9 l.s^{-1}$, které jsou způsobeny zvýšenou vodností z tání sněhu. V následujících měsících se průměrné měsíční průtoky snižují a svého minima dosahují v měsíci září, kdy je dlouhodobě pozorováno $1,8 l.s^{-1}$. Zvýšené průtoky jsou pozorovány i během zimních měsíců, kdy je zvýšená vodnost způsobena značným množstvím zimních srážek, které jsou částečně dešťové. Nejvyšší průměrný měsíční průtok byl v Černíči zaznamenán v březnu 2006 $78,1 l.s^{-1}$, naopak nejnižší v září 2008 $0,03 l.s^{-1}$. Hodnoty variačního rozpětí a variačního koeficientu svědčí o vysoké rozkolísanosti měsíčních průtoků.

Míru variability průměrných měsíčních odtoků charakterizuje koeficient K_r , který uvažuje s procentuálními podíly každého měsíce na průměrném ročním odtoku p_i :

$K_r = \Sigma |p_i - 8,3| / 8,3$, kde p_i je procentuální podíl každého měsíce na průměrném ročním odtoku, 8,3 představuje průměrný podíl každého z měsíčních odtoků (hodnoty $K_r = 0$ představují dokonale vyrovnaný odtok, maximální hodnota nabýt $K_r = 22$, celoroční množství vody odteče za jediný měsíc). Pro povodí Černíčí je hodnota koeficientu $K_r = 7,14$, což svědčí o nevyrovnanosti průtoků během roku.

Graf 5.7: Podíl měsíců a ročních období na ročním odtoku (průměr 2000-2009)



Zdroj: výpočet na základě dat VÚMOP

Z grafu 5.7 je patrné, že největší podíl na ročním objemu odtoku připadá na jaro 45 %, dále na zimu 30 %, podzim 13 % a léto 12 % (tab. 5.9). Tomu odpovídají i průměrné hodnoty měsíčních odtoků: největší podíl na ročním odtoku zaujímají měsíce březen (27 %) O_a , únor (13 %) O_a , duben (11 %).

Tabulka 5.9: Charakteristiky sezónních průtoků v Černíčí (2000-2009)

Roční období	Průměrný sezónní průtok $Q_s (l.s^{-1})$	Průměrný sezónní objem odtoku $O_s (m^3)$	Podíl $O_s \cdot O_a^{-1} (%)$
Jaro	12,4	99 084	44,9
Léto	3,4	27 172	12,3
Podzim	3,6	28 171	12,8
Zima	8,5	65 290	29,6

Zdroj: výpočet na základě dat VÚMOP

5.2.4. Roční průtoky

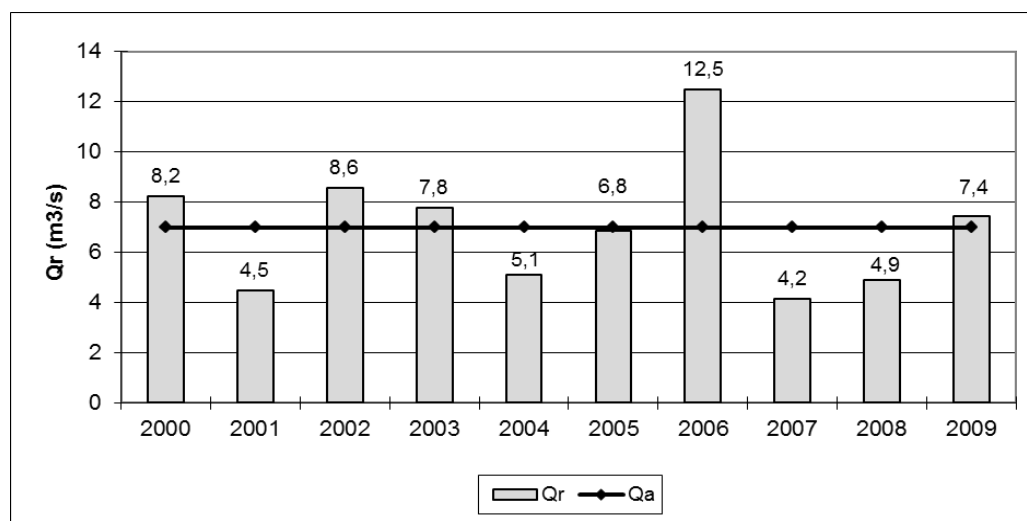
Průměrný roční průtok Q_r ovlivňuje především zdroj vodnosti. V povodí Černíči veškerá voda pochází z dešťových srážek, případně z tání sněhu. Průměrný roční průtok v závěrovém profilu zájmového povodí činí $Q_a = 6,48 \text{ l.s}^{-1}$. Graf 5.8 uvádí průměrné roční průtoky v Černíči. Nejvyšší průměrný roční průtok byl zaznamenán v roce 2006 $12,5 \text{ l.s}^{-1}$, nejmenší průměrný roční průtok v roce 2007 $4,25 \text{ l.s}^{-1}$.

Tabulka 5.10: Charakteristika ročních průtoků v Černíči (2000-2009)

Charakteristika	Hodnota
Průměrný roční průtok Q_a	$6,48 \text{ l.s}^{-1}$
Maximální roční průtok $Q_{r_{max}}$	$12,5 \text{ l.s}^{-1}$
Minimální roční průtok $Q_{r_{min}}$	$4,25 \text{ l.s}^{-1}$
Variační rozpětí $Q_{r_{max}} - Q_{r_{min}}$	$8,25 \text{ l.s}^{-1}$
Směrodatná odchylka δ_r	$2,4 \text{ l.s}^{-1}$
Variační koeficient C_{vr}	34,95 %

Zdroj: výpočet na základě dat VÚMOP

Graf 5.8: Průměrné roční průtoky ze stanice Černíči (2000-2009)



Zdroj: výpočet na základě dat VÚMOP

Pro porovnání vodnosti vodního toku v jednotlivých letech lze použít poměr průměrného ročního průtoky a dlouhodobého průměrného průtoky vyjádřeného v procentech $k_Q = Q_r \cdot Q_a^{-1} \cdot 100 [\%]$. V roce 2006, kdy byl zaznamenán nejvyšší průměrný průtok, dosáhla hodnota k_Q 192 %. V roce 2007, s nejnižším průměrným ročním průtokem, dosáhla hodnota k_Q 64 %. Odlišnost jednotlivých let od

dlouhodobého průměru je patrná z grafu 5.8, kde tmavomodrá čára znázorňuje dlouhodobý průměrný průtok.

5.3. Mimořádné srážko-odtokové události

Mimořádná srážko-odtoková událost je v této práci definována jako taková událost, která vyvolá zvednutí výšky hladiny v měrném přelivu v závěrové části povodí na více než 20 cm, resp. $26,1 \text{ l.s}^{-1}$. Tabulky 5.11 a 5.12 (na konci kapitoly) uvádějí přehled počtů výskytu mimořádných událostí za období 1991-2009 ve vegetačním a mimovegetačním období v Černíči. Pakliže událost nastala na přelomu měsíce, je započítána do měsíce, v kterém započala. Důvodem pro rozdělení období na dva časové úseky: 1991 -1999 a 2000 a 2009 je přístup k podrobnějším datům o srážkách a průtocích od roku 2000. Úsek 1991-1999 je o rok kratší a zároveň se při hodnocení musí vést v patrnosti, že v roce 1991 probíhalo měření až od 8. 5. 1991.

Z analýzy četnosti mimořádných událostí vyplývá (graf 5.9, na konci kapitoly), že během sledovaného období nastala definovaná odtoková situace v 81 případech ve vegetačním období a v 94 případech v mimovegetačním období, což odpovídá v průměru devíti událostí ročně. Ve vegetačním období se události nejčastěji vyskytují v červenci. Vzhledem k nízkým hodnotám průměrných denních průtoků lze příčinu hledat ve výskytu náhlých a vydatných srážkových událostech, které způsobí rychlé zvednutí hladiny. V mimovegetačním období se vyskytují tyto události nejčastěji v březnu, kdy odteče v dlouhodobém průměru nejvíce vody. Vysoké průtoky jsou dány jarním táním sněhu doplněnými více či méně vydatnými srážkami. Jarní průtoky často dlouhodobě oscilují na hranici 20 cm výšky hladiny na přelivu. Ve vegetačním i mimovegetačním období se vyskytlo v období 1991-1999 průměrně méně událostí než v období 2000-2009.

Události ve vegetačním období se vyznačují průměrnou kratší dobou trvání a průměrnou vyšší maximální výškou hladiny na přelivu. Ke kulminaci průtoků většinou dochází v odpoledních a večerních hodinách.

Na základě průběhu hydrogramu jsou události ve vegetačním období rozčleněny do tří typů. Z analýzy vyplývá, že nejčastěji (až 60 % případů) se vyskytují události typu A, který se vyznačuje rychlou kulminací průtoků, který nejprve pozvolně klesá a následně poměrně rychle opadne. Rychlý vznik průtoků je reakcí na přívalové srážky. V případě,

že dochází k opakování srážek v rozmezí několika hodin až dnů, dochází k výskytu typů B (26 %) nebo C (10 %).

5.3.1. Příčiny mimořádných událostí

Z analýzy srážkových situací, které předcházely zvýšení průtoku v měrném profilu (tab. 5.13), vyplývá, že se na jejich vzniku nejčastěji podílela synoptická situace SWc2 (18 %), situace Wc (12 %) a Ec (10 %). Celkově se na vzniku mimořádných událostí podílelo 13 typů situací: SWc2, Wc, Ec, Vfz, SWc3, SWc1, Bp, B, Nc, Wal, NEc, Wcs, C.

Výskyt mimořádných odtokových událostí bývá nejčastěji spojen se situací tvořenou SWc2 (jihozápadní cyklónou 2. typu). Ve vegetačním půlroce v období 2000-2009 představovala tato povětrnostní situace v Černíči v 19 % příčinu k jejich vzniku. Při SWc2 dochází k proudění vlhkého vzduchu ze Středomoří. Na frontálním rozhraní poté dochází ke vzniku častých a opakujících se srážek. Situace SWc2 je v našich podmínkách pro vznik povodňových situací typická. Vznikem a průběhem srážek jsou této situaci velmi podobné situace SWc1 (jihozápadní cyklonální situace 1. typu) a SWc3 (jihozápadní cyklonální situace 3. typu). Celkově se tyto typy podílely na vzniku mimořádných odtoků ve 27 %.

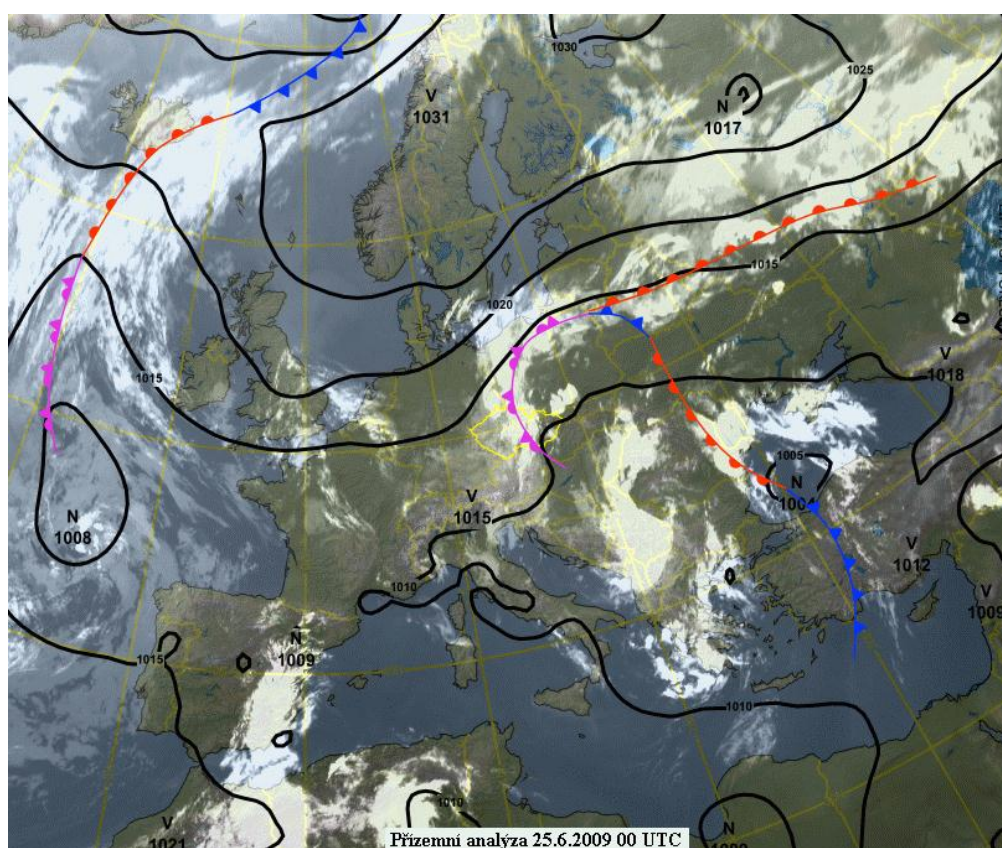
Během situace Wc (západní cyklonální) dochází v létě k přílivu oceánského chladnějšího vlhkého vzduchu od západu. V západním proudění přecházejí přes střední Evropu frontální systémy, které zapříčiňují vznik srážek. Tato situace patří k nejčastějším na našem území.

Během sledovaného roku 2009 nastaly v Černíči tři mimořádné srážko-odtokové situace. První a druhá nastaly 30. 6. a 1. 7. 2009 a byly zapříčiněny synoptickou situací Ec (východní cyklonální). Od 21. 6. proudil do střední Evropy po přední straně tlakové výše nad východním Atlantikem studený vzduch od severozápadu až severu. Čelo studeného vzduchu tvořilo zvlněné frontální rozhraní nad Ukrajinou, Balkánem a centrálním Středomořím. Na tomto rozhraní se v oblasti Itálie vytvořila mělká tlaková níže, která 22. 6. 2009 postoupila nad centrální Balkán. Současně se nad Severním mořem a postupně i nad severozápadním Ruskem budovala oblast vysokého tlaku vzduchu, která blokovala postup frontálních vln. V severovýchodním proudění mezi tlakovými útvary postupovaly pak tyto okludující systémy na naše území a postupně přinášely vlhký, teplý a labilní vzduch ze Středomoří a z černomořské oblasti. Rozložení tlakových útvarů se po 12 dní

téměř neměnilo (obr. 5.1). Docházelo k intenzivním a opakujícím se srážkám v ČR, které na mnoha místech způsobily povodně (ČHMÚ, 2009). Během této události došlo k vyřazení měření hladiny mimo provoz. Údaje o odtokových vlnách byly získány rekonstrukcí z mechanického limnigrafu. Během dvou dnů spadlo v Černíci 40 mm srážek. Průběh odtokových vln je znázorněn v grafu 5.10. Jedná se o příklad vlny typu C (nastalo více vrcholů a vlna po opadnutí kulminace pozvolně klesala).

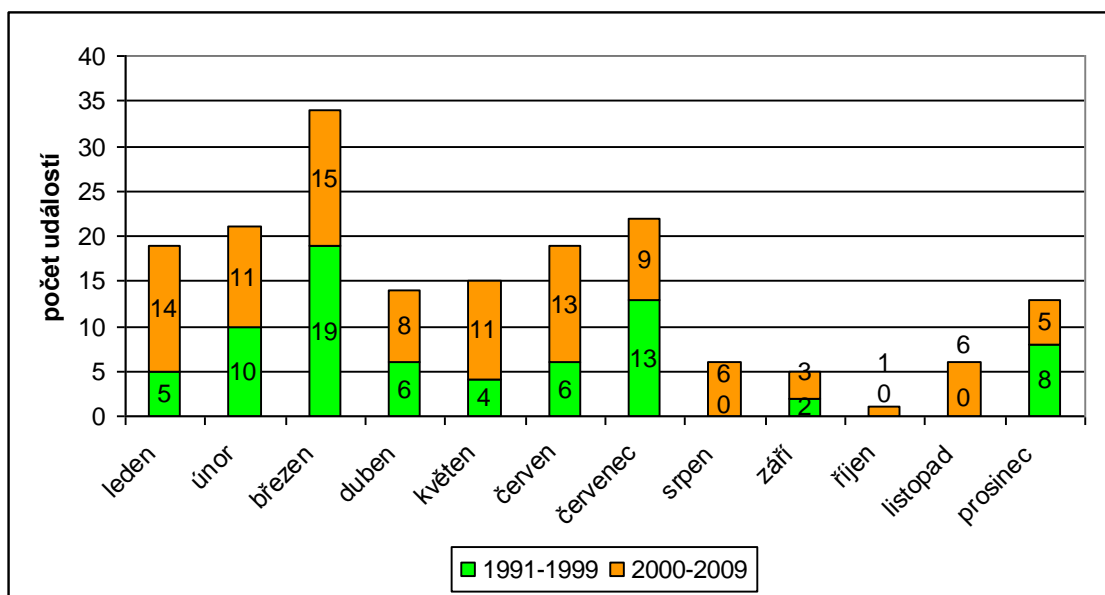
Třetí situace nastala 2. 8. 2009 odpoledne. Přes naše území postupovala výrazná studená fronta, před níž vrcholil příliv teplého vzduchu od jihozápadu. Odpolední teploty se pohybovaly nad 30 °C, proto se na této frontě vyskytly četné bouřky s intenzivními srážkami (obr. 5.2). V měrném profilu došlo v důsledku srážky o celkovém úhrnu 52,5 mm ke zvýšení hladiny na 80 cm. Z průběhu odtokové vlny a chodu srážek 2. 8. 2009 (obr. 5.3) je patrné, že k odtoku dochází bezprostředně po dopadu srážek. Vlna představuje typického zástupce typu A.

Obrázek 5.1: Rozložení tlakových útvarů na přelomu června a července 2009



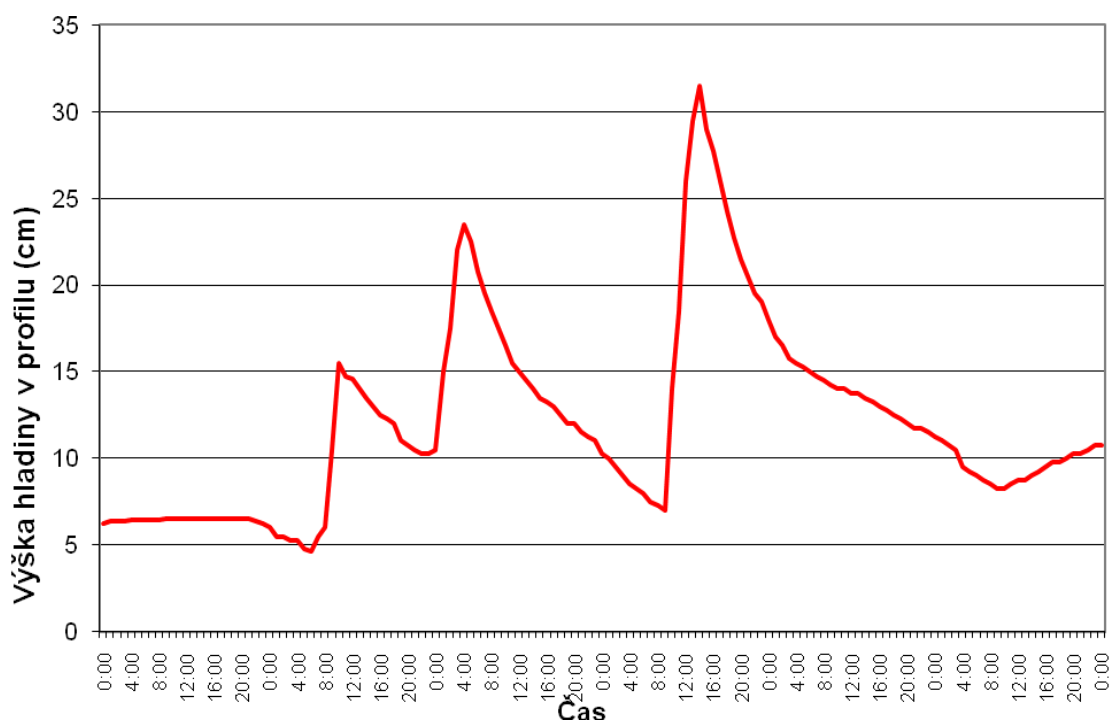
Zdroj: ČHMÚ (2009)

Graf 5.9: Celkový počet mimořádných srážko-odtokových událostí v Černíči podle měsíců (1991-2009)



Zdroj: zpracováno na základě dat VÚMOP

Graf 5.10: Průběh výšky hladiny na měrném profilu Černíči 28. 6. 2009 - 3. 7. 2009



Zdroj: VÚMOP

Tabulka 5.11: Přehled počtu událostí ve vegetačním období

Rok	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	Celkem	Výška hladiny max. (cm)	Datum výskytu max. výšky hladiny (IV-IX)
1991^{*)}	-	0	0	0	0	0	0	12	15.8.
1992	0	0	0	2	0	0	2	34	6.7. /18:00
1993	0	0	0	0	0	0	0	15,2	1.4.
1994	1	0	0	0	0	0	1	21	12.4 /11:00.
1995	1	3	4	2	0	2	12	64	30.5. /22
1996	3	1	2	2	0	0	8	40,5	13.6. / 2:00
1997	1	0	0	4	0	0	5	34,5	7.7 / 22:00
1998	0	0	0	0	0	0	0	14,5	12.8. / 22:15
1999	0	0	0	3	0	0	3	48	13.7. / 19:15
2000	0	0	2	1	0	0	3	64,3	14.6. / 0:0
2001	1	3	4	2	0	0	10	64,4	6.5. / 1:15
2002	0	0	0	2	1	0	3	32,5	19.8. / 6:00
2003	0	5	1	0	0	0	6	90	20.5. / 0:00
2004	0	0	1	1	0	0	2	23	9.7. / 0:30
2005	2	0	0	1	2	1	6	59,5	12.9. / 22:00
2006	4	3	4	0	1	0	12	56	17.5. / 3:30
2007	0	0	0	2	1	2	5	63,4	23.8. / 18:50
2008	1	0	0	0	0	0	1	30,3	21.4. /13:28
2009	0	0	1	1	1	0	3	73,2	2.8. /17:28
Období					Počet událostí				
1991 ^{*)} - 1999					31				
2000 - 2009					50				
1991 ^{*)} -2009					81				

^{*)}měření probíhá od 8. 5. 1991

Zdroj: VÚMOP

Tabulka 5.12: Přehled počtu událostí v mimovegetačním období

Rok	I.	II.	III.	X.	XI.	XII.	Celkem	Výška hladiny max. (cm)	Datum výskytu max. výšky hladiny (IX-IV)
1991^{*)}	-	-	-	-	-	3	3	31	19.12. / 23:30
1992	1	2	6	0	0	2	11	33	6.1. / 0:15
1993	1	2	2	0	0	1	6	38,6	16.3. / 16:00
1994	1	0	1	0	0	1	3	25,8	28.12. / 6:00
1995	2	0	0	0	0	1	3	31	23.12. / 21:45
1996	0	2	8	0	0	0	10	39,5	19.3. / 16:30
1997	0	2	1	0	0	0	3	36	12.2. / 11:00
1998	0	0	0	0	0	0	0	22,5	28.10. / 21:00
1999	0	2	1	0	0	0	3	39,5	2.3. / 18:00
2000	2	2	1	0	0	0	5	42,5	31.1. / 21:00
2001	0	0	0	0	0	1	1	34,5	6.12. / 12:00
2002	1	3	2	1	4	1	12	42,5	21.1. / 16:00
2003	4	0	1	0	0	0	5	51	3.1. / 0:00
2004	1	1	2	0	0	0	4	36	3.2. / 6:45
2005	1	2	1	0	0	0	4	50	12.2. / 14:00
2006	4	0	1	0	0	0	5	57,5	27.3. / 14:00
2007	0	2	3	0	1	3	9	26,5	11.11. / 17:00
2008	1	0	2	0	1	0	4	22,5	19.1. / 9:00
2009	0	1	2	0	0	0	3	38,5	1.3. / 16:55
Období							Počet událostí		
1991 ^{*)} - 1999							42		
2000 - 2009							52		
1991 ^{*)} - 2009							94		

*)měření probíhá od 8. 5. 1991

Zdroj: VÚMOP

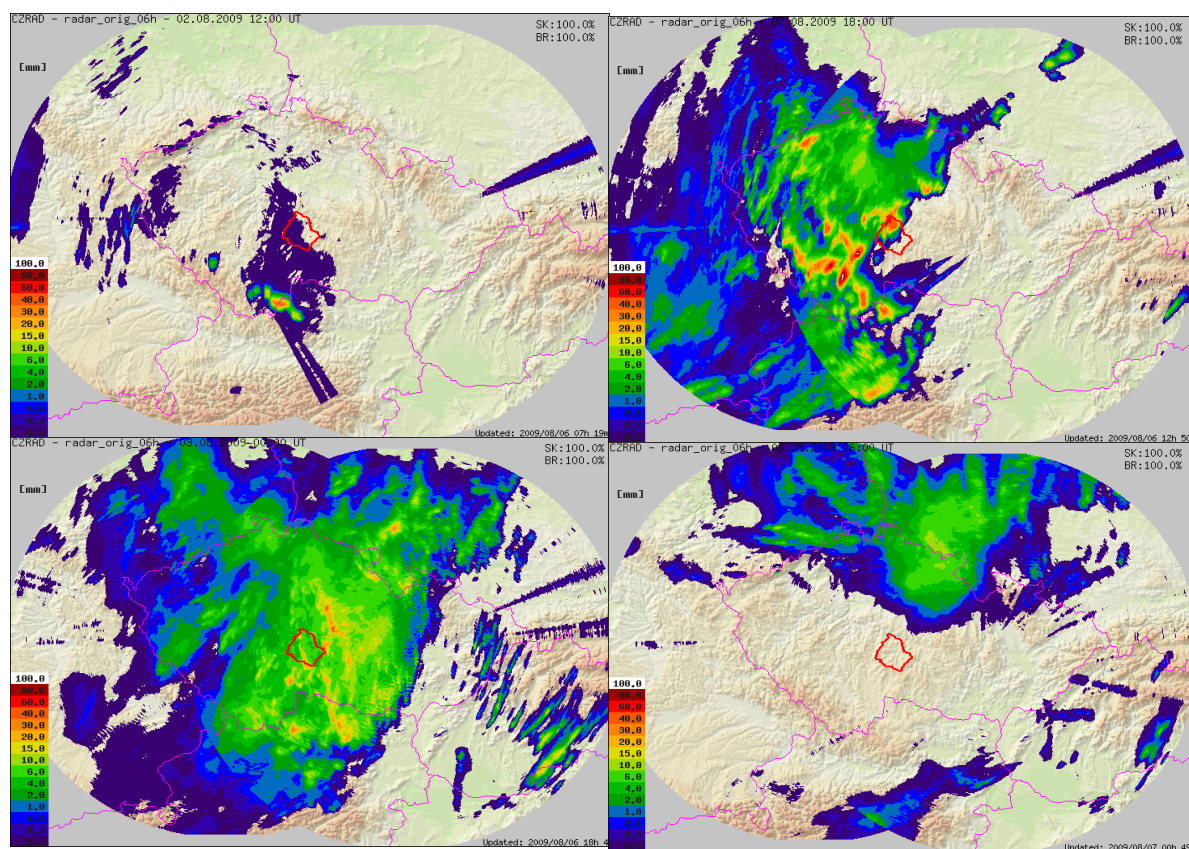
Tabulka 5.13: Přehled mimořádných srážko-odtokových událostí v Černíči a jejich příčin (2000 – 2009)

Datum	Max. výška hladiny (cm)	Délka zvednutí hladiny nad 20 cm (hod)	Synoptická situace				Úhrn srážek (mm)				DX
			D	D-1	D-2	D-3	D	D-1	D-2	D-3	
5.6.2000	41	4	Vfz	Vfz	A	A	-	-	-	-	-
14.6.2000	64,3	5	Ec	Ec	Bp	Bp	30,6	0	0	0	Ec
25.7.2000	59	6	SWc3	SWc3	SWc3	NEc	53,6	0,1	0	0	SWc3
8.4.2001	22,5	4	Bp	Bp	Wc	Wc	16,8	14,4	0,1	0	Bp
5.5.2001	33	17	B	B	B	Sa	45,6	1,5	0	0	B
14.5.2001	25	1	SWc2	Ap3	Ap3	Nea	-	-	-	-	-
18.5.2001	32,5	6	Bp	SWc2	SWc2	SWc2	18,7	1,4	0	5,9	Bp
1.6.2001	43	1	NWs	Vfz	Vz	Wc	7	2,6	0,1	8,2	Wc
11.6.2001	29	18	SWc3	SWc3	SWc3	SWc3	6,3	14,4	10,1	0,5	SWc3
12.6.2001	23,5	3	Ap2	SWc3	SWc3	SWc3	0	6,3	14,4	10,1	SWc3
22.6.2001	62	18	Nc	Nc	NEc	NEc	10,4	9,1	0	0	Nc
1.7.2001	53,5	1	Wal	Wal	Wal	Wal	7,7	7,1	0,1	1,2	Wal
21.7.2001	25	5	Bp	Bp	Bp	Bp	0	32,2	11,9	2,5	Bp
3.7.2002	24	1	Bp	Bp	Ap2	Ap2	0	0	0	0	-
16.7.2002	21,5	1	Ec	Ec	Ec	Ec	33,2	0	0,1	0,6	Ec
13.8.2002	32,5	51	C	C	C	Sec	25,5	42,8	27,3	0,1	C
9.5.2003	82,5	4	SWc2	SWc2	Ap2	Sa	24,1	0,7	0	0	SWc2
11.5.2003	39,5	5	SWc2	SWc2	SWc2	SWc2	0,2	23,8	24,1	0,7	SWc2
13.5.2003	40,5	1	Bp	SWc2	SWc2	SWc2	14,6	4,4	0,2	23,8	SWc2
18.5.2003	34	1	SWc2	SWc2	Ap2	Bp	6,5	3,2	0	0,5	SWc2
20.5.2003	90	6	Bp	SWc2	SWc2	SWc2	16,8	1,3	6,5	3,2	SWc2
5.6.2003	50	5	SWc2	SWc2	SWc2	Sa	20,1	0	0,1	0,1	SWc2
2.6.2004	20,5	1	Wcs	Wcs	Wcs	Ap3	51,4	1,9	0	0	Wcs
9.7.2004	23	1	SWc1	SWc1	SWc2	SWc2	0,2	32,7	0,3	3,8	SWc1
9.4.2005	20,5	3	B	B	B	SWc2	9,6	14,1	0	0	B
10.4.2005	20,5	1	B	B	B	B	0,1	9,6	14,1	0	B
10.7.2005	27	1	NEc	C	C	C	16,5	10,7	21,4	9	C
16.8.2005	22,5	10	NEc	NEc	Wal	Wal	16,7	40,1	6,3	0,7	NEc
22.8.2005	42	48	Ec	Ec	NEa	NEa	16	20	29	0	NEa
12.9.2005	59,5	11	C	C	C	Sa	24	10	2,4	0,1	C
1.4.2006	33	15dní	Wcs	SWc2	SWc2	SWc2	0,3	5	1,6	1,2	SWc2
16.4.2006	23,5	48	Wc	Wc	Wc	Wc	9,8	0	11,7	2,9	Wc
26.4.2006	25	6	Vfz	Vfz	Vfz	Vfz	17,3	0,1	0,1	5,5	Vfz

Datum	Max. výška hladiny (cm)	Délka zvednutí hladiny nad 20 cm (hod)	Synoptická situace				Úhrn srážek (mm)				DX
			D	D-1	D-2	D-3	D	D-1	D-2	D-3	
17.5.2006	56	12	Vfz	Vfz	Ap3	Bp	10,1	21,6	0	2,5	Vfz
26.5.2006	23,5	1	Wc	Wc	Ap1	Bp	15	1,4	0	0,1	Wc
28.5.2006	31,5	15	Wc	Wc	Wc	Wc	3,9	27	15	1,4	Wc
1.6.2006	20,5	10	Nc	Nc	Nc	Wc	11,7	1,2	2,6	7,6	Nc
20.6.2006	45,6	2	Wal	Wal	Ap2	Bp	0	14,2	0,1	0	Wal
22.6.2006	47	1	SWc1	SWc1	Wal	Wal	4	9,9	0	14,2	Wal
30.6.2006	38	49	NEc	SWc2	SWc2	SWc2	16,2	60	10,8	2,6	SWc2
8.8.2006	24	1	NEc	NEc	C	C	1	40	19	24,5	NEc
9.7.2007	72	4	Bp	Wc	Wc	Wcs	9	10	0	0	Wc
18.7.2007	60	30	SWc2	SWa	SWa	SWa	33,4	20,7	0	0	SWc2
23.8.2007	67	5	C	C	C	B	34,8	0,1	0	0,2	C
6.9.2007	25,5	7	Ec	Ec	Nc	Nc	28	22,5	2,3	6,5	Ec
28.9.2007	21,5	1	C	C	B	B	9,4	6,2	0,1	17,4	B
30.6.2009	24	4	Ec	Ec	Ec	Ec	18,5	21,9	0,3	0,3	Ec
1.7.2009	32	10	Ec	Ec	Ec	Ec	4,9	18,5	21,9	0,3	Ec
2.8.2009	73,2	80	Bp	Wal	Wal	Wal	52,5	0	0	0,1	Bp

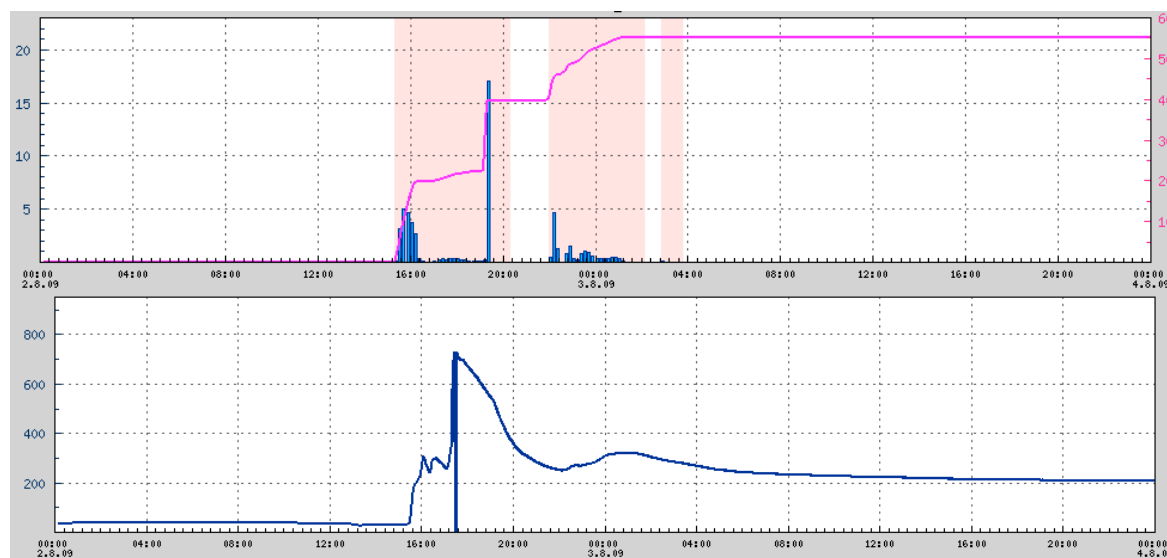
Zdroj: VÚMOP, ČHMÚ

Obrázek 5.2: Postup srážkového pásma nad ČR 2. 8. 2009 na radarových snímcích v šestihodinovém kroku (červeně je vyznačeno povodí Želivky)



Zdroj: ČHMÚ

Obrázek 5.3: Množství srážek a výška hladiny na přelivu 2. 8. 2009 – 3. 8. 2009



Zdroj: VÚMOP

6. Sledování kvality vody a transportu plavenin

Na základě pravidelně odebíraných vzorků povrchových vod jsou analyzovány vybrané ukazatele kvality vody a zařazeny podle ČSN 757221. Přehled ukazatelů společně s údaji o počtu vyhodnocovaných vzorků a sledovaném období je uveden v tabulce 6.1. V období 22. 12. 2006 – 11. 11. 2008 byly prováděny odběry v průměru jednou měsíčně. Poté nastala v odběrech proluka a další vzorky byly odebírány v období 18. 3. 2009 – 26. 2. 2010 průměrně dvakrát měsíčně. Relativně nízká četnost odběru vzorků může způsobit zkreslení výsledků.

Z výsledků je patrné, že na základě koncentrace dusičnanů lze tok stále zařazovat do V. třídy jakosti vod – velmi silně znečištěná voda. Přítomnost dusičnanů v půdě svědčí o vysokém antropogenním ovlivnění v povodí. V povodí se nenacházejí žádné bodové zdroje znečištění, avšak na zemědělských půdách jsou v hojné míře používána dusičnanová hnojiva. Dusičnany se snadno rozpouštějí ve vodě a infiltrují do podzemních vod. Drenážní systém v Černíči způsobuje zrychlení odtoku dusičnanů z povodí. Z výsledků je patrná i sezónnost koncentrací dusičnanů. Ve vegetačním období klesá, protože jsou dusičnany spotřebovávány vegetací, zatímco v mimovegetačním období koncentrace narůstá (graf 6.1). Vysoká průměrná hodnota koncentrace dusičnanů v dubnu je ovlivněna jarním hnojením polí.

Podle koncentrací celkového a fosforečnanového fosforu (graf 6.2) je tok zařazován do III. třídy jakosti vod – znečištěná voda. Příčinu znečištění lze vysvětlit používáním hnojiv v zemědělství. Fosfor je absorbován ve svrchní části půdy a do vody se dostává prostřednictvím povrchového odtoku.

Na základě chemické spotřeby kyslíku dichromanem je vodní tok také zařazován III. třídy jakosti vod – znečištěná voda. CHSKCr slouží jako indikátor organického znečištění vod (graf 6.3).

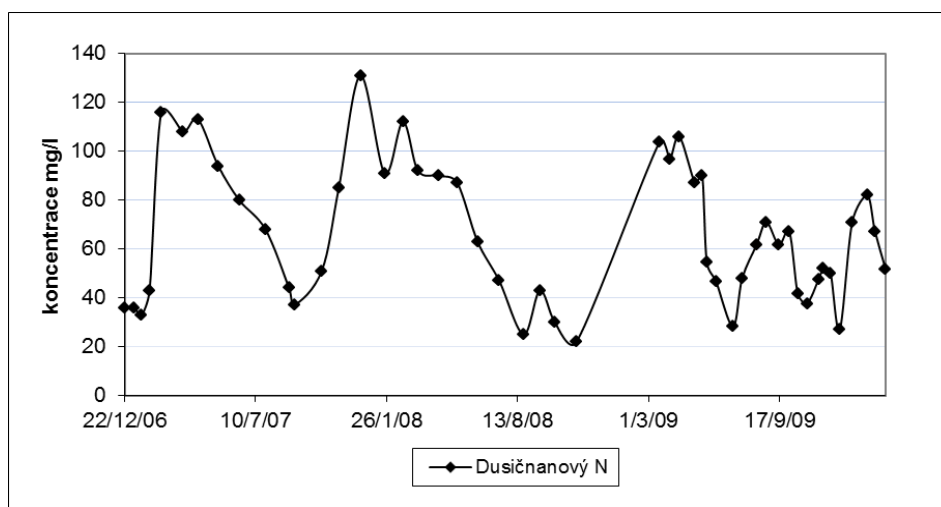
Na základě koncentrací nerozpuštěných látek, dusitanového a amoniakálního dusíku náleží tok do I. třídy jakosti vod a lze jej z tohoto pohledu hodnotit jako neznečištěný. Hodnoty reakce vody pH se pohybují v mezi hodnotami (graf 6.4) 6,2 - 7,8, což

odpovídá imisním limitům pro vodárenské toky podle nařízení vlády č. 82/1999 (Langhammer, 2002).

Konduktivita je ukazatel, který svědčí o přítomnosti rozpuštěných znečišťujících látek ve vodním toku. Hodnoty konduktivity naměřené v povodí odpovídají II. třídě jakosti vody – mírně znečištěná voda (graf 6.5). Znečištění je dáno pravděpodobně přítomností rozpuštěných látek, které nejsou samostatně monitorovány.

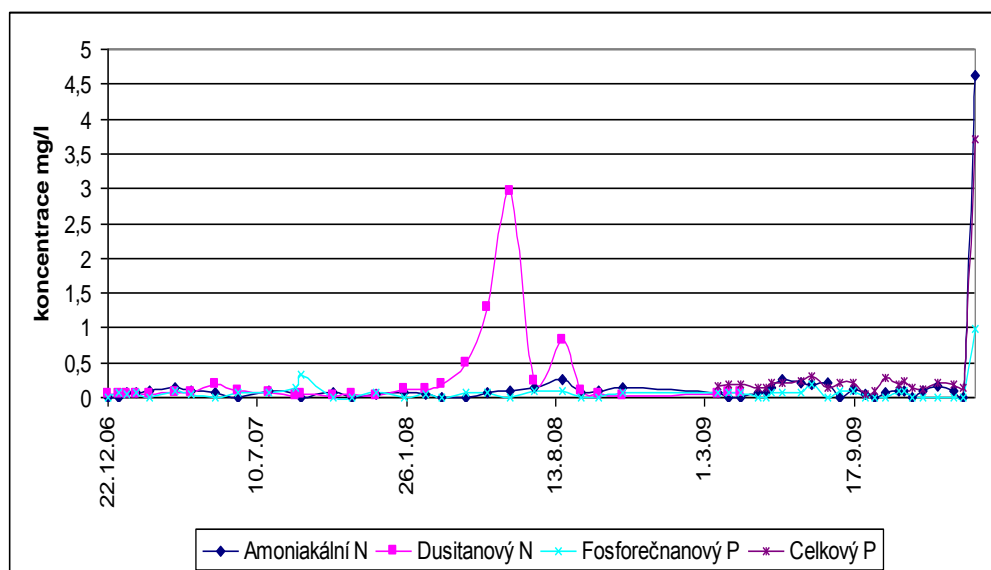
Tabulka 6.2 udává průměrné hodnoty koncentrací vybraných ukazatelů kvality povrchových vod. Tabulka 6.3 uvádí hodnoty specifického látkového odnosu v Černíči.

Graf 6.1: Chod koncentrací dusičnanů v Černíči



Zdroj: VÚMOP

Graf 6.2: Chod ukazatelů anorganického znečištění v Černíči



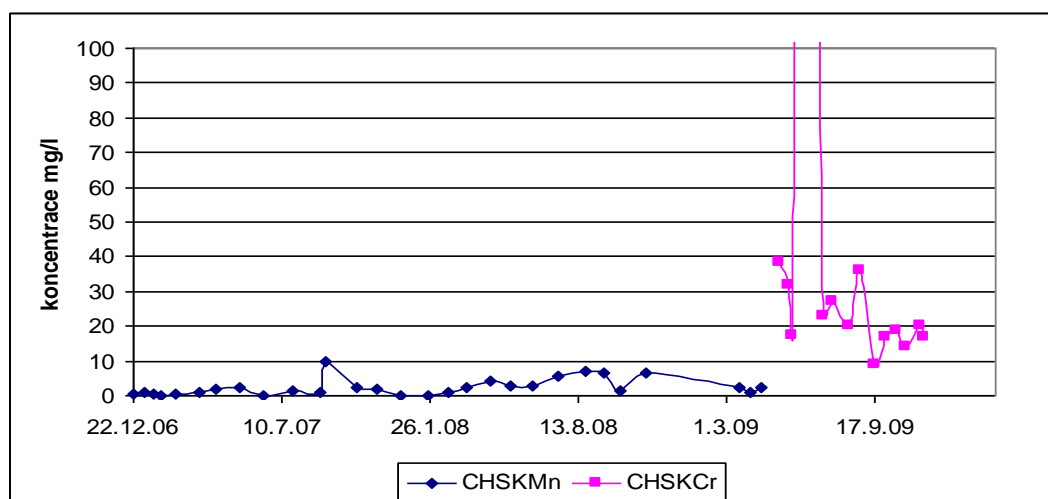
Zdroj: VÚMOP

Tabulka 6.1: Ukazatele jakosti vody a zařazení vodního toku do třídy kvality vody podle ČSN 757221

Název ukazatele	Doba měření	Počet stanovených hodnot	- počet hodnot pod mezí stanovitelnosti	Aritmetický průměr hodnot	Medián hodnot	Charakteristická hodnota	Třída jakosti vody ČSN 757221	Aritmetický průměr průtoků v profilu ve dnech odběrů vzorků [l.s ⁻¹]
Dusičnanový N mg.l ⁻¹	22.12.06 - 26.2.10	49	0	65,9	61,7	115,3	V	4,9
Dusitanový N mg.l ⁻¹	22.12.06 – 17.4.09	29	0	0,3	0,06	1,8	I	3,7
Amoniakální N mg.l ⁻¹	22.12.06 – 26.2.10	49	13	0,2	0,1	0,3	I	4,9
NL mg.l ⁻¹	11.11.08 – 26.2.10	22	0	0,6	0,3	1	I	6
CHSK-Mn mgO ₂ .l ⁻¹	22.12.06 – 17.4.09	29	4	2,5	1,7	6,9	II	3,7
CHSK-Cr mgO ₂ .l ⁻¹	11.5.09 – 23.11.09	14	0	54,2	20,2	38,5	III	5,84
Fosforečnanový P mg.l ⁻¹	22.12.06 – 26.2.10	49	20	0,1	0,1	0,3	III	4,9
Celkový P mg.l ⁻¹	18.3.09 - 26.2.10	17	0	0,2	0,2	0,2	III	6,2
pH	22.12.06 – 23.11.09	43	0	7,2	7,2	7,7	I	4,4
Konduktivita μS.cm ⁻¹	22.12.06 – 23.11.09	43	0	358,2	368	409,7	II	4,4
Sírany *) mg.l ⁻¹	16.11.09- 23.11.09	2	0	39	-	-	-	1,9
C org. *) mg.l ⁻¹	16.11.09- 23.11.09	2	0	4,3	-	-	-	1,9
Barva *) m ⁻¹	16.11.09- 23.11.09	2	0	0,9	-	-	-	1,9
CHSK Mn *) mgO ₂ .l ⁻¹	16.11.09 – 23.11.09	2	0	3,7	-	-	-	1,9
Dusitanový N*) mg.l ⁻¹	16.11.09 – 23.11.09	2	0	0,1	-	-	-	1,9
Alkalita *) mmol.l ⁻¹	16.11.09 – 23.11.09	2	0	1	-	-	-	1,9
N org. *) mg.l ⁻¹	16.11.09 – 23.11.09	2	0	0,9	-	-	-	1,9

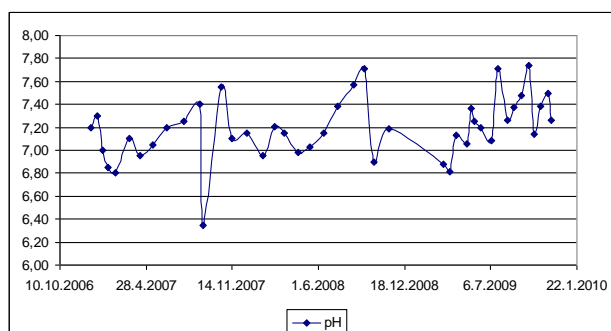
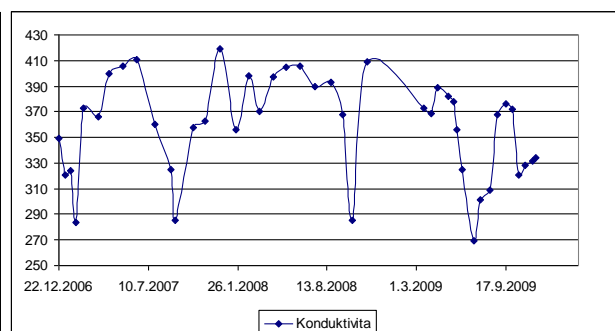
*)údaje nelze statisticky hodnotit a zařadit do třídy jakosti vod, byly zjištěny pouze 2 hodnoty

Zdroj: odvozeno na základě dat VÚMOP, ČSN 757221

Graf 6.3: Chod ukazatelů organického znečištění v Černíči

Pozn. Hodnota z 12. 6. 2009 (470 mg.l^{-1}) se nachází mimo graf.

Zdroj: VÚMOP

Graf 6.4: Chod pH v Černíči**Graf 6.5: Chod konduktivity v Černíči**

Zdroj: VÚMOP

Tabulka 6.2: Průměrné měsíční hodnoty koncentrací vybraných ukazatelů v Černíči (22. 12. 2006 - 26. 2. 2010)

Měsíc	Dusičnanový N mg.l^{-1}	Amoniakální N mg.l^{-1}	Fosforečnanový P mg.l^{-1}	Konduktivita $\mu\text{S.cm}^{-1}$	pH
11	51,74	0,09	0,07	360	7,26
12	56,5	0,04	0,02	384	7,18
1	59,3	0,08	0,03	321	7
2	114	0,19	0,02	386	7
3	89,8	0,07	0,19	371	6,98
4	101,45	0,02	0,07	389	6,97
5	82,54	0,08	0,03	385	7,15
6	63	0,12	0,05	244	7,18
7	47,8	0,11	0,09	330	7,36
8	50,4	0,13	0,06	349	7,4
9	47,2	0,06	0,15	343	7,18
10	45,4	0,2	0	333	7,34

Zdroj: vypočteno na základě dat VÚMOP

Tabulka 6.3.: Průměrný specifický látkový odnos z povodí Černíči (za dobu měření)

Ukazatel	Doba měření	Specifický látkový odnos za den $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$
Dusičnanový N	22. 12. 06 - 26. 2. 10	20,8
Dusitanový N	22. 12. 06 – 17. 4. 09	0,07
Amoniakální N	22. 12. 06 – 26. 2. 10	0,06
NL	11. 11. 08 – 26. 2. 10	0,23
Fosforečnanový P	22. 12. 06 – 26. 2. 10	0,03
Celkový P	18. 3. 09 - 26. 2. 10	0,08

Zdroj: vypočteno na základě dat VÚMOP

6.1. Koncentrace látek a transport plavenin během mimořádných událostí

Vzorkovač SIGMA 900 MAX byl v povodí Černíči nainstalován na jaře roku 2008. Automatické odebrání vzorků bylo nastaveno na první odběr při výšce hladiny 25 cm na přelivu. Dosud se však nepodařilo pomocí tohoto přístroje odebrat vzorky vody za účelem srovnání koncentrací látek a plavenin s běžnými hodnotami.

V roce 2008 se v době aktivity zařízení žádná taková událost nevyskytla. V roce 2009 nastaly ve vegetačním období dvě události, kdy hladina přesáhla 25 cm. Během první z nich 1. 7. 2009 došlo pravděpodobně v důsledku elektrického výboje při bouři k selhání měření hladiny a vzorkovač nedostal impuls k odběru vzorků. Během události 2. 8. 2009 došlo k výpadku elektřiny při bouři, který způsobil vyřazení měřících mechanismů mimo provoz. Vzorkovač opět nedostal impuls k odběru vzorků. Z těchto důvodů nebylo možné zpracovat v časovém rámci této práce žádné výsledky. Dříve byl v povodí instalován jiný vzorkovač VÚMOP, pomocí kterého se měřil objem plavenin během mimořádných událostí. Výsledky toho výzkumu jsou uvedeny v kapitole 4.2.5.

7. Erozní ohrožení v Černíči

V této kapitole jsou popsány výsledky erozních modelů USPED a WaTEM/ SEDEM a zachyceny poznatky terénního šetření v povodí. Pro porovnání výsledků byla vyčíslena i rovnice USLE. Oba modely byly vyhotoveny na základě totožných vstupních dat. K hodnocení pomocí modelů byly vybrány roky 1994, 2001, 2007 a 2009. Výsledky v jednotlivých letech se liší na základě rozdílné vstupní vrstvy C faktoru. Rok 1994 reprezentuje stav, kdy jsou v povodí pěstovány erozně nenáchylné plodiny, pšenice a jetel. V letech 2001 a 2007 je na velké části povodí pěstována kukuřice (80 % plochy povodí v roce 2001, v roce 2007 60 % plochy povodí). Tyto dva roky byly vybrány, aby bylo možné srovnat vliv zatravnění údolnice na erozně-akumulační procesy v povodí při pěstování stejné plodiny. V roce 2009 byla v povodí převážně pěstována pšenice a byl vyhodnocen proto, že v tomto období bylo prováděno i terénní šetření v povodí.

7.1. Výsledky modelu USPED

Mapové výstupy modelu USPED z let 1994, 2001, 2007 a 2009 jsou znázorněny na obrázku 7.1. Místa, kde dochází k erozi půdy, jsou na mapách znázorněny červenou barvou, naopak místa, kde dochází k akumulaci materiálu zelenou barvou. Absolutní výsledky ztráty půdy podle modelu USPED obsahuje tabulka 7.1.

Na první pohled je z výsledných map patrné, že k erozi dochází na svazích v celém povodí. Jako nejohroženější označil model místa, která se vyznačují nejvyšší hodnotou sklonů svahů. Na těchto místech dosahuje hodnota intenzity ztráty půdy až $20 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Intenzita eroze se dále liší podle pěstované plodiny, avšak rozdíly ve faktoru C se projevují velmi málo. Erozně nejnáchylněji se projevuje kukuřice a brambory, nejlépe naopak porosty jetele.

K akumulaci erodovaných částic dochází podle modelu ve svahových úpadech a v hlavním údolí. Nejvíce je patrná akumulace materiálu na okrajích hlavní údolnice. Zde dochází jednak ke zmenšení sklonů a také k přechodu z orné půdy na TTP, což vede ke snížení transportní kapacity materiálu. Ochranný vliv vegetace TTP se

projevuje zpomalením a akumulací materiálu. Na hranici dvou pozemků, kde pozemek s nižším C faktorem se nachází níže po svahu, dochází k akumulaci materiálu. Tento jev můžeme pozorovat i v jiných částech povodí. Nejpatrnější je akumulační pruh na mapě z roku 1994 na levé straně povodí, který vznikl na rozhraní pšenice a jetele. K akumulaci materiálu dochází i v depresích v postranních svahových úpadech. Zatravnění údolnice v roce 2003 se na výsledcích výrazně neprojevilo. V letech 2007 a 2009 je patrná nevelká akumulace materiálu na hranici nově zatravněné plochy.

Na linii hlavní údolnice lze pozorovat četné střídání míst s výskytem akumulace a eroze, protože zde dochází k častým změnám transportní kapacity. Nápadným nepravděpodobným jevem je výskyt rovnoběžných pruhů eroze a akumulace na obou stranách povodí, který může být způsoben algoritmem výpočtu nebo nedokonalostí zpracování v prostředí GIS.

Z pohledu erozně-akumulačních procesů zůstávají nedotčené plochy lesů a intravilánu. Model USPED pracuje především na základě digitálního modelu terénu. Vliv ochranného krytu vegetace a erodibility půd se v mapových výstupech projevují velmi málo.

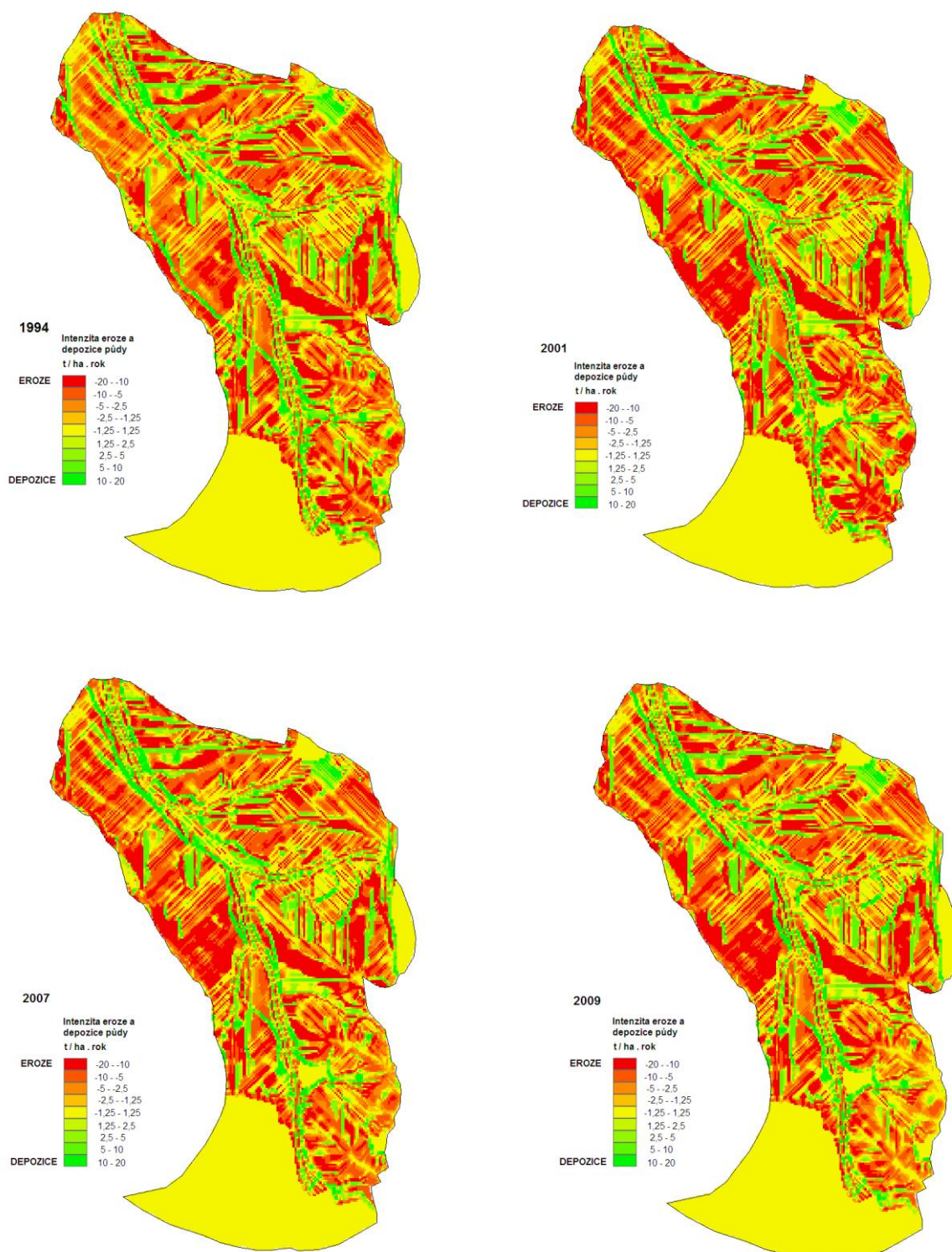
Průměrná míra eroze v povodí, která je dána podílem celkové eroze půdy v povodí a plochy, se pohybuje mezi $3,9 - 4,1 \text{ t.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$. Celková ztráta půdy, která je dána rozdílem celkové eroze půdy a celkové depozice půdy z povodí přepočítaným na jednotku plochy, se pohybuje mezi $2,59 - 3,85 \text{ t.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ (tab. 7.1). Nejnížší absolutní hodnoty udávající intenzitu ztrátu půdy v povodí nastaly v roce 1994 a 2009, nejvyšší naopak v roce 2001. V roce 2007 je ztráta půdy z povodí na hektar nižší než v roce 2001. Na tomto výsledku se pravděpodobně promítl vyšší podíl obilnin v povodí než v roce 2001 a v menší míře i zatravnění údolnice.

Tabulka 7.1: Výsledky modelu USPED v Černíči

Výsledek	1994	2001	2007	2009
Celková eroze půdy v povodí [t.rok^{-1}]	522	577	547	528
Průměrná míra eroze v povodí [$\text{t.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$]	3,9	4,3	4,1	3,9
Celková depozice půdy v povodí [t.rok^{-1}]	174	128	181	179
Celková ztráta půdy z povodí [t.rok^{-1}]	347	449	365	349
Ztráta půdy z povodí [t.rok^{-1}]	2,59	3,85	2,72	2,61

Zdroj: vlastní výpočet pomocí modelu USPED

Obrázek 7.1: Eroze a depozice půdy v Černíči podle modelu USPED v letech 1994, 2001, 2007, 2009

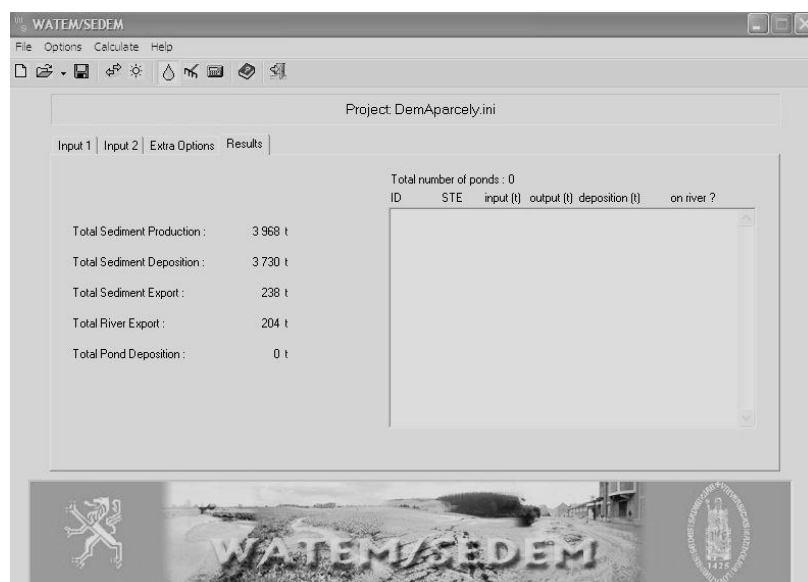


Zdroj: vlastní výpočet pomocí modelu USPED

7.2. Výsledky modelu WaTEM/ SEDEM

Hlavní výsledky modelu WaTEM/ SEDEM se zobrazují v dialogovém okně *Results* (výsledky, obr. 7.2). Jedná se o absolutní čísla, která udávají pět položek: *Total Sediment Production* (celková eroze půdy z povodí), *Total Sediment Deposition* (celková akumulace půdy v povodí), *Total Sediment Export* (množství půdních částic vstupujících do vodního toku), *Total River Export* (celkové množství plavenin transportované závěrovým profilem) a *Total Pond Deposition* (množství sedimentů zachycených v nádržích). Výsledky modelu v letech 1994, 2001, 2007 a 2009 jsou zapsány v tabulce 7.2.

Obrázek 7.2: Dialogové okno Results programu WaTEM/ SEDEM



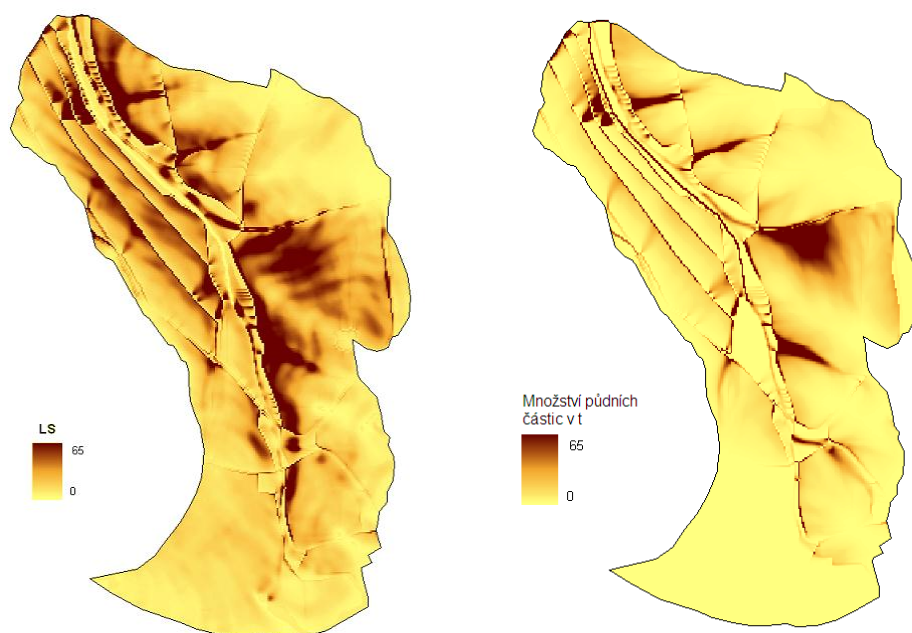
Zdroj: Van Rompaey a kol. (2001); Van Oost a kol. (2000), Verstraeten a kol. (2002)

Program zároveň zapíše výsledky modelu do několika souborů v textovém formátu *.txt. Vytvoří soubory *Pitdata.txt* (seznam a pozice nalezených bezodtokých míst), *Pond Sediment Deposition.txt* (množství sedimentů v nádržích), *Ponddata.txt* (seznam a pozice nalezených nádrží), *projectriversediment.txt* (seznam jednotlivých úseků toků a množství sedimentu v nich). Tyto soubory nejsou pro tuto práci podstatné, protože se týkají sedimentů v nádržích, které se v povodí nevyskytují.

Model WaTEM/ SEDEM poskytuje mapové výstupy v rastrovém formátu Idrisi32 *.rst, jehož rozlišení odpovídá rozlišení vstupních vrstev. V případě, že jsou jako výstupní jednotky zvoleny $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, program poskytne tyto výstupy: *pit.rst* (bezodtoká místa),

pondnr.rst (vodní plochy s ID číslem), *uparea.rst* (velikosti zdrojových ploch jednotlivých elementů DEM), *ls.rst* – viz obr. 7.3 (hodnoty LS faktoru), *inflowton.rst* (množství půdních částic vstupující do jednotlivých elementů řešených ploch), *outflowton.rst* – viz obrázek 7.3 (množství půdních částic vystupujících z jednotlivých elementů řešených ploch), *netto water erosion in ton per ha.rst* (hodnoty ztráty půdy - záporné hodnoty, hodnoty akumulace půdy - kladné hodnoty) v jednotlivých elementech DEM.

Obrázek 7.3: Dílčí výsledky modelu WaTEM/SEDEM vypočtené pouze na základě vrstev DEM a pozemků před 2003. LS faktory (*ls.rst*) vlevo a množství půdních částic vystupujících z elementů povodí (*outflowton.rst*) vpravo.



Zdroj: výpočet pomocí modelu WaTEM/SEDEM

Tabulka 7.2: Výsledky modelu WaTEM/SEDEM v Černíči

Výsledek	1994	2001	2007	2009
Celková eroze půdy v povodí [t.rok ⁻¹]	607	3771	3170	712
Průměrná míra eroze v povodí [t.ha ⁻¹ .rok ⁻¹]	4,5	28,1	23,7	5,3
Celková depozice půdy v povodí [t.rok ⁻¹]	583	3459	3112	682
Celková ztráta půdy z povodí [t.rok ⁻¹]	24	312	58	30
Celkové množství plavenin transportované závěrovým profilem [t.rok ⁻¹]	19	278	53	28
Ztráta půdy z povodí [t.rok⁻¹]	0,179	2,328	0,433	0,224

Zdroj: výpočet pomocí modelu WaTEM/SEDEM

Na obrázku 7.3 jsou znázorněny dílčí výsledky modelu WaTEM/ SEDEM. Grafické znázornění LS faktoru napomáhá k porozumění konečným výsledkům. Nejvyšší hodnoty dosahuje LS faktor na pravé části povodí v údolnicích a na svazích ve střední části povodí. Na levé části povodí jsou hodnoty LS faktoru nižší, protože svahy jsou přerušeny hranicemi jednotlivých honů. Prakticky však má hranice honů význam jenom tehdy, pakliže jsou na honech pěstovány odlišné plodiny nebo jsou-li hony odděleny mezí. Mapa množství vystupujících sedimentů ukazuje hlavní zdrojové oblasti erodovaného materiálu. Nejvíce materiálu pochází podle modelu WaTEM/ SEDEM ze svahových úpadů v pravé části povodí.

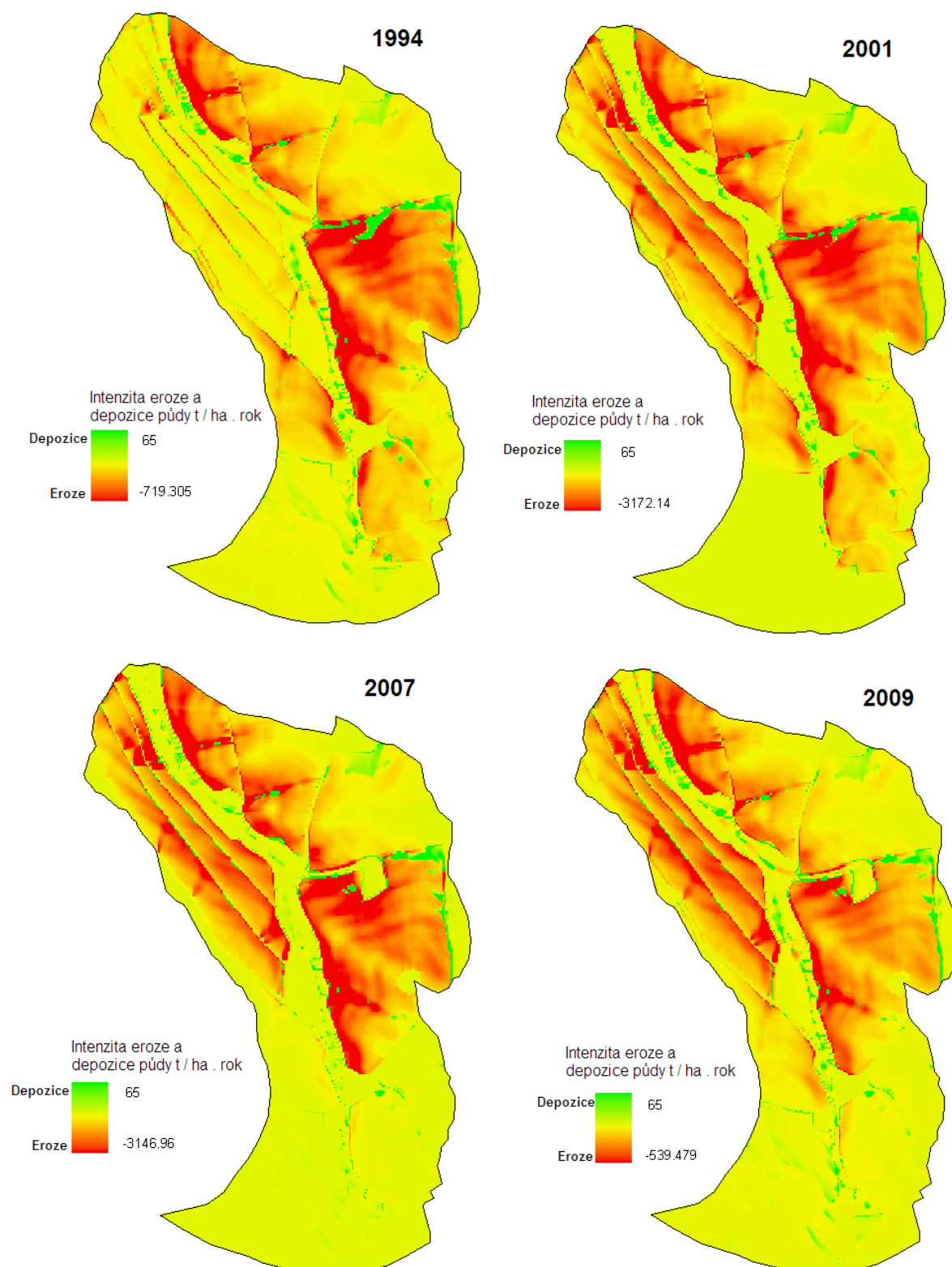
Obrázek 7.4 ukazuje výsledky modelu v letech 1994, 2001, 2007 a 2009. Nejvíce erozí postižená místa označil model svahy a svahové úpady v pravé části povodí, tedy v místech, kde je vysoký LS faktor. Intenzita eroze se však v jednotlivých letech značně liší. Nejvyšších hodnot dosahuje v roce 2001 a 2007 na pozemcích, kde byla pěstována kukuřice. V levé části povodí se intenzita eroze odvíjí od pěstované plodiny, tedy od C faktoru. Z map je zřejmé, že intenzita eroze je ovlivněna sítí cest a hranicemi honů, které přerušují délku svahů. Na hranici honů dochází ke zpomalení povrchového odtoku a částečné akumulaci materiálu.

K akumulaci uvolněných půdních částic dochází nejvíce v hlavním údolí a částečně i na dnech pravostranných svahových úpadů.

Z hlediska erozně-akumulačních procesů jsou neutrální plochy lesů, trvalých travních porostů mimo hlavní údolnici a orná půda na severovýchodě povodí. Na ploše lesů se vyskytují v letech 1994 a 2009 drobné, těžko zdůvodnitelné, akumulace materiálu.

Model WaTEM/ SEDEM se projevil jako značně citlivý vůči hodnotě C faktoru. Průměrná míra eroze v povodí se pohybuje mezi $4,5 - 28,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Celková ztráta půdy v povodí přepočítaná na jednotku plochy se podle modelu WaTEM/ SEDEM pohybuje mezi $0,179 - 2,328 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ (tab. 7.2). Nejnižší absolutní hodnoty udávající intenzitu ztrátu půdy v povodí nastaly v roce 1994 a 2009, nejvyšší naopak v roce 2001. V roce 2007 je ztráta půdy z povodí na hektar podstatně nižší než v roce 2001. Na významné změně se podílí zatravnění údolnice, které chrání jednu z erozně nejnáchylnějších ploch v povodí.

Obrázek 7.4: Eroze a depozice půdy v Černíči podle modelu WaTEM/ SEDEM v letech 1994, 2001, 2007, 2009



Zdroj: výpočet pomocí modelu WaTEM/ SEDEM

7.3. Výsledky rovnice USLE

Pro porovnání dosažených výsledků modelu USPED a WaTEM/ SEDEM je vyčíslena a graficky zpracována i rovnice USLE za použití totožných vstupních parametrů. Rovnice USLE na rozdíl od modelů USPED a WaTEM/ SEDEM nepočítá s akumulací materiálu.

Obrázek 7.5 ukazuje výsledky rovnice USLE v letech 1994, 2001, 2007 a 2009. Za nejvíce erozí postižená místa byly označeny svahy a svahové úpady v pravé části povodí, tedy v místech, kde je vysoký LS faktor. Intenzita eroze se v jednotlivých letech liší. Nejvyšších hodnot dosahuje v roce 2001 a 2007 na pozemcích, kde byla pěstována kukuřice. V levé části povodí se intenzita eroze odvíjí od pěstované plodiny, tedy od C faktoru. Intenzita eroze je ovlivněna sítí cest a hranicemi honů, které přerušují délku svahů.

Z hlediska erozních procesů jsou neutrální plochy lesů, trvalých travních porostů mimo hlavní údolnice a orná půda na severovýchodě povodí.

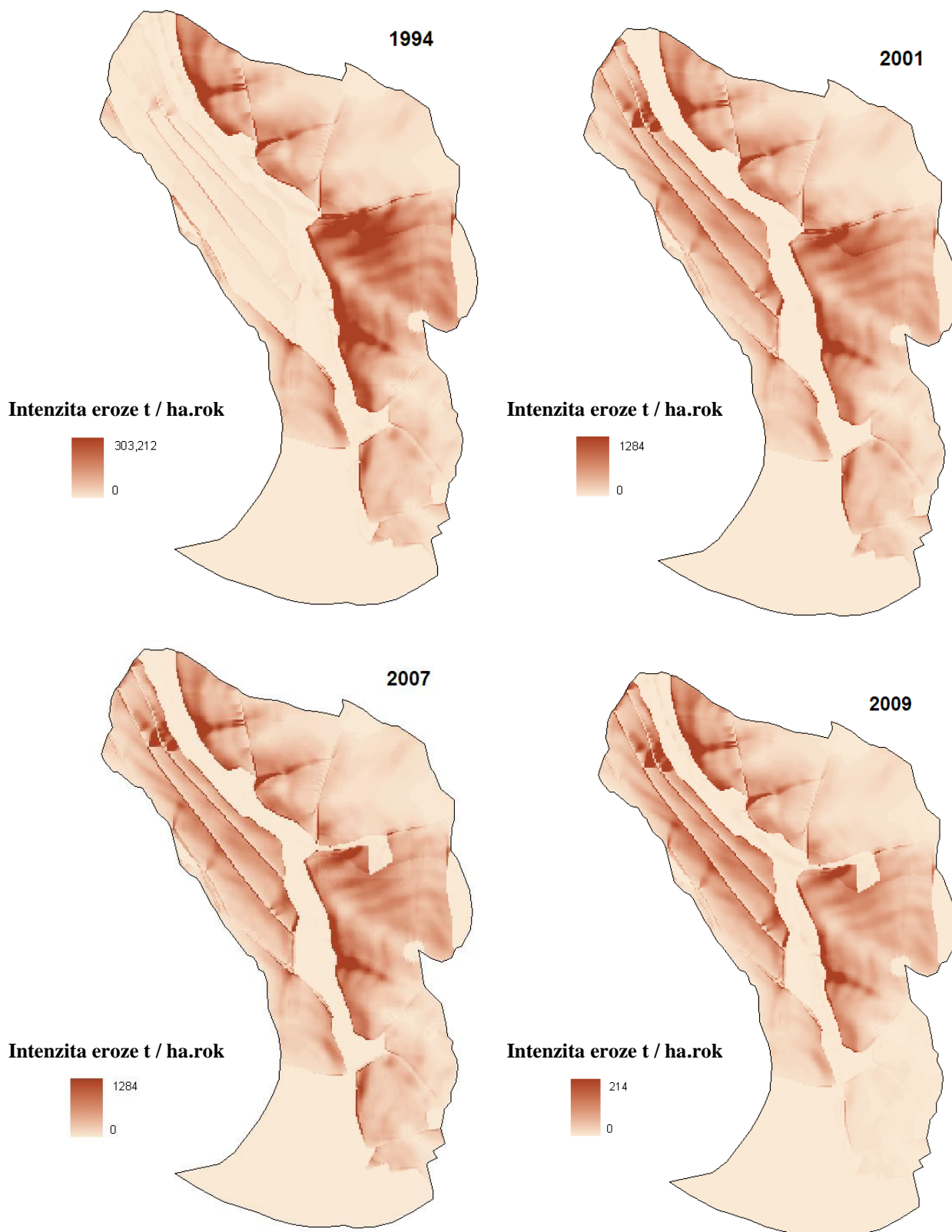
Výsledky rovnice USLE projevily jako citlivé vůči hodnotě C faktoru. Průměrná míra eroze půdy v povodí se podle rovnice USLE pohybují mezi 4,32 – 27,86 t.ha⁻¹.rok⁻¹. (tab. 7.3). Nejnížší absolutní hodnoty udávající intenzitu ztrátu půdy v povodí nastaly v letech 1994 a 2009, nejvyšší naopak v roce 2001. V roce 2007 je ztráta půdy z povodí na hektar podstatně nižší než v roce 2001. Zatravnění údolnice se podle rovnice USLE projevilo na intenzitě eroze pozitivně.

Tabulka 7.3: Výsledky rovnice USLE v Černíči

Výsledek	1994	2001	2007	2009
Celková eroze půdy v povodí [t.rok ⁻¹]	577,54	3733,24	3202,61	660,62
Průměrná míra eroze v povodí [t.ha ⁻¹ .rok ⁻¹]	4,32	27,86	23,90	4,93

Zdroj: výpočet pomocí rovnice USLE

Obrázek 7.5: Eroze půdy v Černíči podle rovnice USLE v letech 1994, 2001, 2007, 2009



Zdroj: výpočet pomocí rovnice USLE

7.4. Současné projevy eroze v Černíči

V Černíči jsou nyní patrné četné projevy eroze půdy. Terénním šetřením během roku 2009 byla zjištěna místa, kde dochází k erozi nebo akumulaci půdy.

7.4.1. Eroze v důsledku tání sněhu

Na začátku února 2009 docházelo v důsledku zvýšení teplot k pomalému odtávání sněhu. Tání sněhu nemělo díky již vzrostlému ozimému obilí žádné extrémní projevy eroze. K vytváření erozních rýh docházelo pouze ve vyjetých stopách od zemědělské techniky po jejich celé délce. Rýhy byly mělké, jejich hloubka dosahovala 2 cm, šířka přibližně 5 cm (obr. 7.6).

Obrázek 7.6: Erozní rýhy ve vyjetých stopách od zemědělské techniky



Zdroj: vlastní foto (6. 2. 2009)

V březnu docházelo k opětovnému tání sněhu v důsledku náhlého oteplení. Kromě již zmíněných rýh ve stopách po zemědělské technice, docházelo v povodí ke tvorbě dalších výrazných erozních rýh. V místě označeném na mapě (obr. 7.13, str. 117) číslem 4 se i přes vegetační kryt vytvořila erozní rýha dlouhá 4,5 m, široká 10 cm, hluboká 5 cm (obr. 7.8). Na zemědělsky upraveném půdním povrchu docházelo v tomto místě k vzniku akumulací odtávané vody. Výše po svahu nad mezí docházelo k plošné erozi a ke vzniku rozsáhlého akumulárního tělesa o rozměrech 50 m x 5 m tvořeného z písčitých půdních částic. Jeho mocnost se pohybovala mezi 2-10 cm. Akumulační těleso výrazně přehlušovalo vzešlé ozimé obilí. V místech postižených erozí došlo

k destrukci vzešlých rostlin. Propustek pod silnicí v tomto období nebyl schopný pojmout celé množství vody, která se poté hromadila nad silnicí (obr. 7.7). V lokalitě označené na mapě (obr. 7.13) číslem 3 docházelo k vzniku soustředěného povrchového odtoku, což způsobilo vznik až 50 m dlouhé rýhy o hloubce několika centimetrů, o šířce až 0,5 m. V tomto pásmu docházelo na několika místech k vývěrům vody, celá deprese byla značně zamokřená.

Obrázek 7.7: Akumulace vody nad silnicí



Zdroj: vlastní foto (14. 3. 2009)

Obrázek 7.8: Erozní rýha v místě 4



Zdroj: vlastní foto (9. 4. 2009)

7.4.2. Eroze během mimořádných srážko-odtokových událostí

K mimořádné srážko-odtokové události došlo v Černíči 1. 7. 2009 a 2. 8. 2009. Událost 1. 7. 2009 nevyvolala zřetelné projevy eroze, protože byl půdní povrch pokryt vegetací. 2. 8. 2009 spadlo během čtyř hodin 45 mm dešťových srážek. Protože na některých honech již proběhly žně, přispěl obnažený půdní povrch k rozvoji erozně-akumulačních forem.

V lokalitě č. 1 (obr. 7.13, str. 117) došlo nad mezí pole a trvalého travního porostu k vytvoření akumulace o přibližných rozměrech 20 x 0,5 m, která nabývala mocnosti až 20 cm (obr. 7.10). Nad touto akumulací byly patrné známky výrazné plošné eroze po celé délce svahu. Ve svahovém úpadu označeném č. 2 (obr. 7.10) se utvořila rýha po celé její délce 0,4 m a hluboká místy až 15 cm. Ve spodní části rýhy se vytvořila vějířovitá akumulace štěrku a písku v nejširším místě rozsáhlá až 30 m.

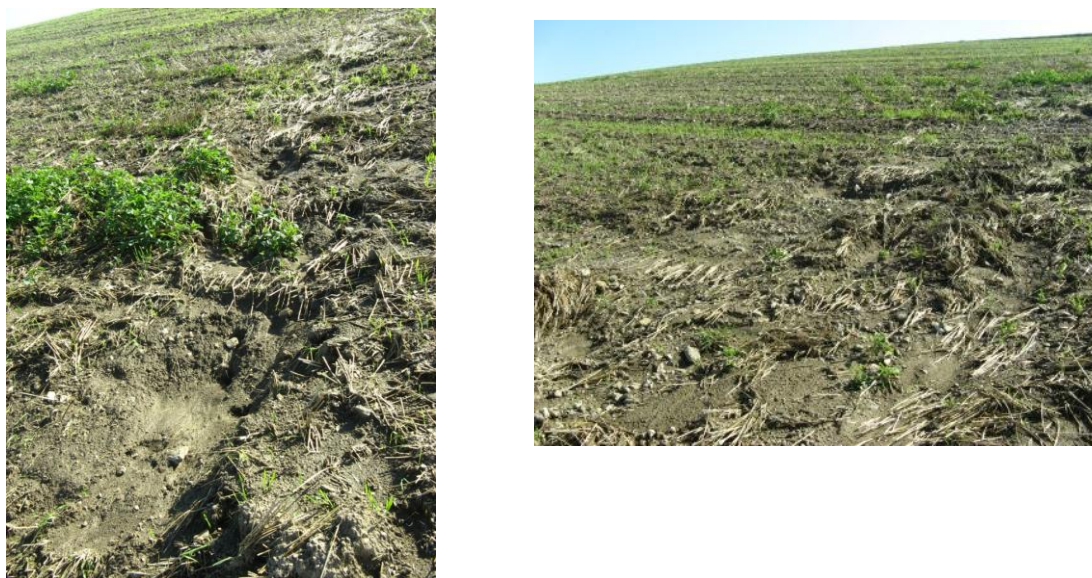
V korytě nad měrným přepadem došlo k akumulaci erodovaných půdních částic, štěrku a jemnozrnného materiálu až do výšky 40 cm, souvislý pás sedimentů byl dlouhý 10 m. Po této srážko-odtokové události došlo k uvíznutí plováku v sedimentu (obr. 7.9).

Obrázek 7.9: Koryto zanesené naplaveninami po události ze dne 2. 8. 2009 (vlevo), stav po vyčištění (vpravo)



Zdroj: vlastní foto (8. 8. 2009 - vpravo a 6. 9. 2009 - vlevo)

Obrázek 7.10: Erozní rýha (lokalita č. 2)



Zdroj: vlastní foto (8. 8. 2009)

Obrázek 7.11: Akumulační tvar (lokalita č. 1)

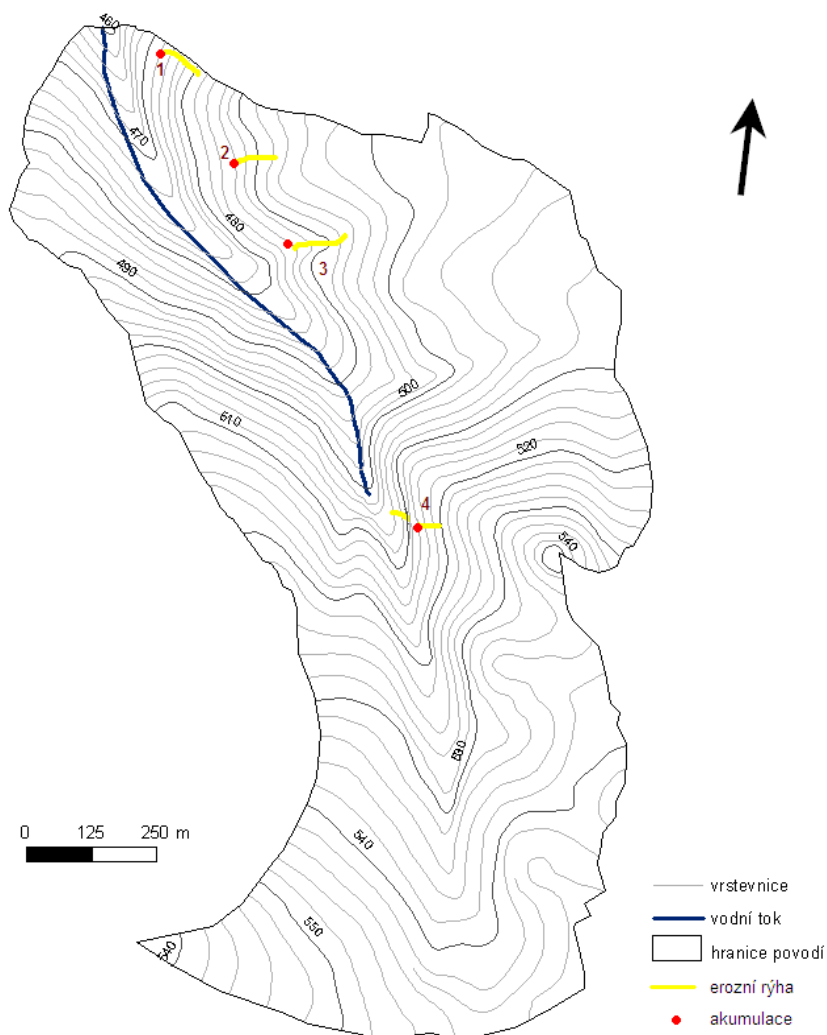
Zdroj: vlastní foto (8. 8. 2009)

Z terénního pozorování je patrné, že místa, ve kterých nejčastěji dochází k rozvoji erozních forem, se nacházejí na drahách soustředěného odtoku. K akumulacím dochází na dolních částech honů nad rozhraními mezi ornou půdou a trvalým travním porostem. Všechna se nacházejí na pravé části povodí, která se vyznačuje vyššími sklony a kratší průměrnou délkou svahů. Nemalou mírou přispívá ke vzniku eroze i používání zemědělské techniky, erozní formy vzniklé ve stopách nejsou výrazné, ale velmi četné. Místa vzniku erozně-akumulačních forem jsou znázorněna na obrázku 7.13. O přítomnosti výrazných projevů eroze svědčí i záběry z leteckého snímku (obr. 7.12).

Obrázek 7.12: Projevy eroze v Černíči

Zdroj: www.mapy.cz, 1. 2. 2010

Obrázek 7.13: Výskyt erozně-akumulačních forem v Černíči v roce 2009 (na obrázku jsou vyznačeny lokality č. 1 – 4)



Zdroj: mapový podklad VÚMOP, terénní šetření (6. 2., 14. 3., 9. 4., 8. 8., 6. 9. 2009)

8. Diskuse

Kapitola 8 se zabývá kritickým zhodnocením dosažených výsledků. Výsledky práce jsou porovnány s předchozím výzkumem v povodí. Výstupy erozních modelů USPED a WaTEM/ SEDEM jsou porovnány s rovnicí USLE a poznatky získanými terénním šetřením.

8.1. Hodnocení srážko-odtokových poměrů

Srážkové a odtokové charakteristiky byly hodnoceny za desetileté období 2000-2009. Desetiletá datová řada postačuje k zachycení dlouhodobých charakteristik, nelze z ní však dostatečně dobře vyhodnotit extrémní hodnoty analyzovaných jevů.

Průměrný roční srážkový úhrn za období 1991-2009 byl stanoven 665 mm, což odpovídá poloze v klimatické oblasti MW7. Při srovnání s hodnotami průměrných ročních úhrnů, které uvádí Johanovský (2004), lze toto období považovat za srovnatelné s obdobím 1901-1950, kde byl průměrný roční úhrn aproximován na hodnotu 660,7 mm. Oproti období 1961-1990, kde byl průměrný srážkový úhrn určen pomocí dat nedaleké srážkoměrné stanice v Čechticích na 724,4 mm, je období 2000-2009 srážkově chudší.

V průměru je letní půlrok na srážky bohatší, spadnou až dvě třetiny průměrného ročního úhrnu. Ze srovnání průměrných měsíčních hodnot s prací Johanovského (2004), které je uvedeno v tabulce 8.1, vyplývá, že největší změny nastaly na jaře: v březnu srážek výrazně přibýlo, naopak v dubnu, květnu a červnu nastal pokles. V říjnu a prosinci lze sledovat mírný pokles, naopak v listopadu, lednu a únoru mírný nárůst.

Tabulka 8.1: Srovnání měsíčních srážkových úhrnů za různá období (mm)

Období	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
1901-1950	41,7	44	41,3	37,3	36,3	50	67,3	77	84,7	76,7	50,7	53,7
1961-1990	48,3	44,5	47,5	40,3	45,8	53,1	86,2	85	86	86,6	53,4	47,5
2000-2009	53,3	39,1	49,5	44,9	60,1	30,4	62,6	70,4	83,8	83,4	54,7	44

Zdroj: Johanovský (2004), výpočet na základě dat VÚMOP

Průměrný roční průtok za období 2000-2009 byl stanoven na $6,48 \text{ l.s}^{-1}$. Uvedené výsledky lze srovnat s prací Kulhavého a kol. (2001), který uvádí výsledky měření za období 1991-2001. Z údajů v tabulce vyplývá, že v období 2000-2009 byly odtoky vyšší a rozkolísanější. V letech 2000-2009 byl naměřen vyšší extrém hodnot.

Tabulka 8.2: Srovnání charakteristik průměrných denních průtoků za různá období

Období	Počet prvků řady	Průměrný průtok $[\text{l.s}^{-1}]$	Maximum Q_d $[\text{l.s}^{-1}]$	Minimum Q_d $[\text{l.s}^{-1}]$	Směrodatná odchylka $[\text{l.s}^{-1}]$
1991-2001	3719	4,46	120	0	0,0590
2000-2009	3653	6,48	200	0	0,0904

Zdroj: Kulhavý a kol. (2001), výpočet na základě dat VÚMOP

Úskalí při hodnocení srážko-odtokových charakteristik nastalo při hodnocení srážek při poruchách měřicích zařízení. Srážka vysokého úhrnu byla vícekrát naměřena až po zaznamenání vyšší hladiny limnigrafem. Tento jev se vysvětlil ucpáním srážkoměru, kdy došlo k naměření výšky srážek z delšího období najednou až při uvolnění srážkoměru. Údaje bylo nutné srovnat s údaji ČHMÚ. Poruchy automatického hladinoměru byly doplněny rekonstrukcí hodnot naměřených pomocí mechanického limnigrafu.

Analýza četnosti mimořádných situací byla provedena za účelem zjištění pravděpodobnosti výskytu mimořádných odtokových událostí v povodí. Ve vegetačním období ukázala v období 1991-2009 v průměru 4,3 událostí ročně. V období 2000-2009 byly mimořádné události četnější.

Analýza příčin mimořádných srážko-odtokových situací ukázala, že ve většině případů jsou způsobeny cyklonálními situacemi SWc2, Wc a Ec, které se často podílejí na vzniku vysokých srážkových úhrnů.

8.2. Kvalita vody a sledování transportu plavenin

Při analýze kvality vody byl v minulosti kladen důraz na hodnocení koncentrací dusičnanů v povrchových a drenážních vodách. Kapitola 7.2. hodnotí kvalitu vody podle všech dostupných parametrů.

Tabulka 8.3 uvádí srovnání hodnot dusičnanového N v letech 1991-2000 a v období 22. 12. 2006-26. 2. 2010. Vodní tok je v obou sledovaných obdobích zařazován do V. třídy jakosti vod.

Podle hodnocení v kapitole 6.1. byl vodní tok na základě koncentrací nerozpuštěných látek zařazen do I. třídy jakosti vod a na základě ukazatelů obsahu fosforu do III. třídy jakosti vod. Analýzy vzorků vody jsou však prováděny pouze 1 – 2 krát měsíčně a nejsou do něj zahrnuty mimořádné odtokové události, během kterých dochází ke zvýšení koncentrací nerozpuštěných látek a fosforu. Model WaTEM/ SEDEM vypočítal množství transportovaných látek vodním tokem v roce 2009 na 28 t, což by odpovídalo při průměrném průtoku množství 123 mg.l^{-1} . Je velmi pravděpodobné, že na základě koncentrací nerozpuštěných látek a fosforu by měl být vodní tok zařazován do nižší třídy jakosti vod.

Vzhledem k poruchám na měřicí stanici se nepodařilo odebrat vzorky vody během mimořádných srážko-odtokových událostí.

Vodní tok v Černíči odpovídá dlouhodobým trendům vývoje kvality vody v ČR v drobných tocích, které se stále vyznačují vysokou mírou znečištění z plošných zdrojů (Langhammer, Kliment, 2006).

Tabulka 8.3: Srovnání hodnot dusičnanového N v povrchové vodě v Černíči

Statistický ukazatel	1991–2000	22. 12. 2006–26. 2. 2010
Průměr [$\text{mg NO}_3.\text{l}^{-1}$]	70,65	65,9
Medián [$\text{mg NO}_3.\text{l}^{-1}$]	68,5	61,7
Minimum [$\text{mg NO}_3.\text{l}^{-1}$]	22	27
Maximum [$\text{mg NO}_3.\text{l}^{-1}$]	168	131
Charakteristická hodnota podle ČSN 757221 [$\text{mg NO}_3.\text{l}^{-1}$]	102,5	115,3
Třída jakosti vody ČSN 757221	V.	V.

Zdroj: Kvítek a kol. (2001), data VÚMOP

8.3. Hodnocení erozních procesů v povodí

K hodnocení erozních procesů jsou použity modely WaTEM/ SEDEM a USPED. Pro porovnání byla vyčíslena i rovnice USLE. Zároveň bylo během roku 2009 provedeno terénní šetření projevů eroze půdy v povodí. Kvantifikace ztráty půdy erozí je obsažena ve Výroční zprávě (Janeček, 2004), jejíž výsledky jsou uvedeny v kapitole 4.2.

Výsledky modelů USPED a WaTEM/ SEDEM jsou odlišné jak v mapových výstupech, tak v absolutních hodnotách ztráty půdy vodní erozí, ačkoli oba modely pracují na bázi rovnice USLE. Model USPED klade důraz především na vlastnosti reliéfu, tzn. digitálního modelu terénu. Výsledky ukazují, že model není příliš citlivý na změny ostatních faktorů. Do modelu WaTEM/ SEDEM vstupuje oproti modelu USPED navíc vrstva silnic, hranic pozemků a vodního toku. Výsledky svědčí o tom, že WaTEM/ SEDEM pružně reaguje na změnu vstupních faktorů.

Modely shodně označily, že k erozi dochází na svazích v celém povodí. Model USPED poukazuje na významnou míru eroze v pravé i levé části povodí bez ohledu na pěstovanou plodinu, zatímco model WaTEM/ SEDEM označuje erozi v pravé části povodí za intenzivnější. Intenzita eroze je podle modelu WaTEM/ SEDEM dána na levé části povodí pěstovanou plodinou, na pravé části povodí vlastnostmi reliéfu. K akumulaci materiálu dochází podle obou modelů v hlavním údolí.

Intenzita eroze na levé části povodí je podle modelu WaTEM/ SEDEM a rovnice USLE částečně snížena hranicemi honů. Jejich význam je však diskutabilní. Terénním šetřením bylo zjištěno, že na hranicích honů se nacházejí často vyjeté koleje od zemědělské techniky, které mohou povrchový odtok zpomalit. Ke snížení intenzity eroze dochází v případě, když jsou na honech pěstovány odlišné plodiny. Pakliže se však žádná překážka nevyskytuje, nemá hranice honů žádný význam.

Modely se liší ve svém přístupu k postranním svahovým úpadům. Zatímco model USPED je označuje jako místa akumulace materiálu, model WaTEM/ SEDEM naopak jako místa eroze půdy.

Zatravnění pravostranné údolnice se projevilo ve výsledcích modelu WaTEM/ SEDEM velmi pozitivně. Místo zatravnění přestalo hrát roli významného zdroje materiálu. Model USPED zatravnění ve svém výsledku nezaznamenal.

USLE na rozdíl od obou aplikovaných modelů počítá pouze ztrátu půdy. Srovnání modelu WaTEM/ SEDEM a rovnice USLE ukazuje, že model WaTEM/ SEDEM z rovnice USLE vychází a je pouze doplněn o místa akumulace materiálu. Z toho

vyplývají i rozdíly mezi výsledky rovnice USLE a modelem USPED v prostorovém rozmístění míst s převládající erozí a akumulací v povodí.

Výsledkem modelů jsou také absolutní hodnoty ztráty půdy za rok. Při aplikaci modelu WaTEM/ SEDEM jsou použity vstupní hodnoty koeficientů podle Van Rompaey (2001). Pro správné vyčíslení by bylo nutné model kalibrovat pro podmínky povodí. Kalibrace však nebyla možná, protože neexistují potřebné datové podklady. Výsledky modelu USPED a rovnice USLE další kalibraci nevyžadují. Tabulka 8.4 uvádí srovnání výsledků ztráty půdy (celková ztráta půdy z povodí/ plocha povodí) obou modelů s měřením množství plavenin v letech 1991-2001. Výsledky modelu USPED jsou o dva řády vyšší než výsledky modelu WaTEM/ SEDEM. Příčinu relativně malé hodnoty výsledku ztráty půdy modelu WaTEM/ SEDEM lze hledat v tom, že model na rozdíl od USPED počítá i s vrstvou vodního toku. Vodní tok se nenalézá na dně údolí, ale byl přesunut na jeho levou stranu. V místech, kde by mělo docházet k odnosu materiálu, dochází v modelu WaTEM/ SEDEM vlivem nízkého C faktoru k akumulaci materiálu, který tak nedosáhne vodního toku.

Tabulka 8.4: Srovnání hodnot ztráty půdy ($t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$) na základě různých metod

Rok	USPED *)	WaTEM/ SEDEM *)	Odnos NL **)
1994	2,59	0,18	0,01
2001	3,85	2,33	13
2007	2,72	0,43	-
2009	2,61	0,22	-

*Zdroj: *) vlastní výpočet, **) Janeček (2004)*

Přípustná ztráta půdy vodní erozí je podle Janečka (2007) v povodí $4 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$. Tabulka 8.5 uvádí srovnání výsledků průměrné míry eroze v povodí za daný rok (celková eroze půdy v povodí/ plocha povodí) obou modelů a výsledků rovnice USLE. Z výsledků je patrné, že hodnoty vypočtené modelem WaTEM/ SEDEM a USLE jsou si velmi podobné, protože jsou vypočítány na stejném základě. WaTEM/ SEDEM a USLE velmi pružně reagují na změnu C faktoru. Výsledky modelu USPED se v letech 2001 a 2007 se jen nepatrně liší od let 1994 a 2009. Podle výsledků modelů WaTEM/ SEDEM a USLE je přípustná ztráta půdy vodní erozí vždy překročena.

Pro ověření číselných výsledků modelů by bylo nutné provádět soustavný monitoring projevů eroze v povodí a množství plavenin ve vodním toku.

Tabulka 8.5: Srovnání průměrné míry eroze ($t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$) na základě různých metod

Rok	USPED	WaTEM/ SEDEM	USLE
1994	3,9	4,5	4,32
2001	4,3	28,1	27,86
2007	4,1	23,7	23,90
2009	3,9	5,3	4,93

Zdroj: vlastní výpočet

Při srovnání výsledků modelů a terénního průzkumu vyplývá, že model WaTEM/ SEDEM lépe odhadl prostorové rozložení projevů eroze. V povodí docházelo v roce 2009 k erozi především ve svahových úpadech v pravé části povodí, kde se soustředil povrchový odtok. Materiál byl však částečně zachycen na hranicích pozemků orné půdy s TTP, což zachycuje lépe model USPED.

Oba modely jsou náročné na zpracování v prostředí GIS. Návodů uveřejněných na internetových stránkách vývojových týmů modelů nejsou vyčerpávající, což stěžuje vypracování zvláště pro nezkušeného uživatele. Model USPED lze vypočítat v prostředí GIS, avšak přesný krokový postup neumožňuje snadnou obměnu vstupních faktorů. Model WaTEM/ SEDEM vyžaduje přesné vyhotovení vstupních vrstev a zvláštní nastavení počítače, avšak poté pracuje rychle a jednotlivé parametry lze snadno obměňovat. Výhodou modelu WaTEM/ SEDEM je na rozdíl od USPED schopnost vyčíslit rovnou celkové množství erodovaných a sedimentovaných půdních částic. Model WaTEM/ SEDEM neumožňuje přímo zobrazit grafické výsledky, které je proto nutné importovat do prostředí GIS.

9. Závěr

Cíle závěrečné práce byly splněny. Na základě poskytnutých srážko-odtokových dat jsou charakterizovány srážko-odtokové charakteristiky povodí Černíčí za období 2000-2009. Zároveň je provedena analýza četnosti a příčin mimořádných srážko-odtokových událostí.

Sledování kvality vody ukazuje dlouhodobě značné znečištění povrchových vod především sloučeninami dusíku a fosforu, které se do vody dostávají jako důsledek intenzivní rostlinné výroby v povodí. Vzhledem k poruchám na měřicí stanici se nepodařilo odebrat vzorky vody automatickým vzorkovačem za účelem srovnání ukazatelů kvality vody za mimořádných srážko-odtokových událostí s běžnými hodnotami, což nechává prostor pro pokračování výzkumu v této oblasti.

V povodí jsou aplikovány erozní modely USPED a WaTEM/ SEDEM v letech 1994, 2001, 2007, 2009. Oba modely se podařilo zprovoznit. Výsledkem jsou mapy znázorňující prostorové rozložení lokalit s převládající erozí a akumulací a dále číselné hodnoty eroze a akumulace půdy v povodí. Protože v povodí neprobíhá systematický monitoring projevů eroze a množství plavenin ve vodním toku, bylo provedeno porovnání výsledků pouze s jiným modelovým přístupem, nejčastěji používanou rovnicí USLE. Částečně je možné porovnat výsledky s poznatky získanými terénním šetřením v Černíčí. Úspěšné otestování modelů na experimentálních plochách je předpokladem pro jejich širší využití.

Seznam grafů

Graf 4.1: Podíl jednotlivých plodin na zemědělské půdě v Černíči (1990-2009)

Graf 5.1: Roční úhrny srážek v Černíči (1991-2009)

Graf 5.2: Úhrn srážek v teplém pololetí v Černíči (2000-2009)

Graf 5.3: Rozložení sezónních a měsíčních úhrnů během roku (průměr 2000-2009)

Graf 5.4: Počet dní s určitou hodnotou denního úhrnu srážek (2000-2009)

Graf 5.5: Průměrné denní průtoky v Černíči (2000-2009)

Graf 5.6: Čára překročení dlouhodobých průměrných denních průtoků (2000-2009)

Graf 5.7: Podíl měsíců a ročních období na ročním odtoku (průměr 2000-2009)

Graf 5.8: Průměrné roční průtoky ze stanice Černíči (2000-2009)

Graf 5.9: Celkový počet mimořádných srážko-odtokových událostí v Černíči podle měsíců (1991-2009)

Graf 5.10: Průběh výšky hladiny na měrném profilu Černíči 28. 6. 2009 - 3. 7. 2009

Graf 6.1: Chod koncentrací dusičnanů v Černíči

Graf 6.2: Chod ukazatelů anorganického znečištění v Černíči

Graf 6.3: Chod ukazatelů organického znečištění v Černíči

Graf 6.4: Chod pH v Černíči

Graf 6.5: Chod konduktivity v Černíči

Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Mezní hodnoty tříd jakosti vod

Tabulka 3.2: K faktor HPJ vyskytujících se v povodí Černíči

Tabulka 3.3: Hodnoty faktoru L pro $m=0,5$

Tabulka 3.4: Hodnoty faktoru S

Tabulka 3.5: Hodnoty C faktoru pro plodiny, které se vyskytly v Černíči (1991-2009)

Tabulka 4.1: Zařazení zájmového území v geomorfologickém systému

Tabulka 4.2: Obecné klimatologické charakteristiky mírně teplé oblasti MW7

Tabulka 4.3: Klimatologické charakteristiky povodí v Černíči

Tabulka 4.4: Změny využití území v Černíči

Tabulka 4.5: Základní geometrické a číselné charakteristiky povodí v Černíči

Tabulka 4.6: Pěstované plodiny v Černíči

Tabulka 4.7: Obhospodařování půdy v Černíči

Tabulka 4.8: Statistické charakteristiky průtoků v Černíči za období 1991-2001

Tabulka 4.9: Hodnoty jednotlivých složek hydrologické bilance v Černíči

Tabulka 4.10: Statistické charakteristiky koncentrací dusičnanového N v Černíči

Tabulka 4.11: Potenciální erozní ohroženost zemědělských půd v Černíči podle USLE

Tabulka 4.12: Odhad kulminačního průtoku a transportu splavenin při desetiletém dešti v Černíči

Tabulka 4.13: Koncentrace a odnos nerozpuštěných látek během přívalového deště 5. 5. - 6. 5. 2001 v Černíči

Tabulka 4.14: Přehled zvýšených odtoků a odnosu nerozpuštěných látek během přívalových srážek

Tabulka 4.15: Přehled zvýšených odtoků způsobených táním sněhu

Tabulka 4.16: Odnos nerozpuštěných látek ze zemědělské půdy v Černíči v $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$

Tabulka 4.17: Experimentální měření smyvu půdy v Černíči při porostu kukuřice na pozemku s lehčí až středně těžkou půdou

Tabulka 5.1: Charakteristika ročních srážkových úhrnů v Černíči (1991-2009)

Tabulka 5.2: Charakteristika srážkových úhrnů v letním pololetí (2000-2009)

Tabulka 5.3: Rozložení měsíčních úhrnů během roku (2000-2009)

Tabulka 5.4: Počet dní s určitou hodnotou denního úhrnu srážek (2000-2009)

Tabulka 5.5: Denní úhrny vyšší než 20 mm v letním pololetí (2000-2009)

Tabulka 5.6: Charakteristika denních průtoků (2000-2009)

Tabulka 5.7: P-procentní denní průtok (2000-2009)

Tabulka 5.8: Charakteristiky měsíčních průtoků v Černíči (2000-2009)

Tabulka 5.9: Charakteristiky sezónních průtoků v Černíči (2000-2009)

Tabulka 5.10: Charakteristika ročních průtoků v Černíči (2000-2009)

Tabulka 5.11: Přehled počtu událostí ve vegetačním období

Tabulka 5.12: Přehled počtu událostí v mimovegetačním období

Tabulka 5.13: Přehled mimořádných srážko-odtokových událostí v Černíči a jejich příčin (2000-2009)

Tabulka 6.1: Ukazatele jakosti vody a zařazení vodního toku do třídy kvality vody podle ČSN 757221

Tabulka 6.2: Průměrné měsíční hodnoty koncentrací vybraných ukazatelů v Černíči (22. 12. 2006-26. 2. 2010)

Tabulka 6.3: Průměrný specifický látkový odnos z povodí Černíči

Tabulka 7.1: Výsledky modelu USPED v Černíči

Tabulka 7.2: Výsledky modelu WaTEM/ SEDEM v Černíči

Tabulka 7.3: Výsledky rovnice USLE v Černíči

Tabulka 8.1: Srovnání měsíčních srážkových úhrnů za různá období (mm)

Tabulka 8.2: Srovnání charakteristik průměrných denních průtoků za různá období

Tabulka 8.3: Srovnání hodnot dusičnanového N v povrchové vodě v Černíči

Tabulka 8.4: Srovnání hodnot ztráty půdy ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$) na základě různých metod

Tabulka 8.5: Srovnání průměrné míry eroze ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$) na základě různých metod

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Pokusné plochy v Třebsíně – simulátor deště a výtok z pokusného pozemku

Obrázek 2.2: Vodní tok znečištěný produkty eroze půdy (profil Černíči)

Obrázek 2.3: Koncentrace látek během mimořádných srážko-odtokových událostí

Obrázek 3.1: Vzorkovač SIGMA 900 MAX

Obrázek 3.2: Vstupní vrstva Parcel map do modelu WaTEM/ SEDEM

Obrázek 3.3: Dialogové okno Input1 programu WaTEM/ SEDEM 2.1.0.

Obrázek 3.4: Dialogové okno Input2 programu WaTEM/ SEDEM 2.1.0.

Obrázek 3.5: Dialogové okno Extra Options programu WaTEM/ SEDEM 2.1.0.

Obrázek 3.6: Uživatelské rozhraní programu LS-converter

Obrázek 4.1: Poloha Černíči v České republice

Obrázek 4.2: Geologické podloží v Černíči

Obrázek 4.3: Nadmořská výška v Černíči

Obrázek 4.4: Sklonitost v Černíči

Obrázek 4.5: Orientace svahů v Černíči

Obrázek 4.6: Dráhy soustředěného odtoku v Černíči

Obrázek 4.7: Půdní typy v Černíči

Obrázek 4.8: Půdní druhy v Černíči

Obrázek 4.9: Hydrologické skupiny půd v Černíči

Obrázek 4.10: Rozsah odvodnění v povodí Černíči

Obrázek 4.11: Využití půdy v Černíči (2010)

Obrázek 4.12: Využití půdy v Černíči a. 1850, b. 1920, c. 1955, d. 1985

Obrázek 4.13: Zatravnění údolnice (situace před - vlevo a po roce 2003 - vpravo)

Obrázek 4.14: Zemědělský ráz krajiny v Černíči

Obrázek 4.15: Vodivostní sonda v Černíči

Obrázek 4.16: Přehled měrných míst v Černíči

Obrázek 4.17: Stanice pro klimatologická a hydrologická pozorování v Černíči

Obrázek 4.18: Konsumpční křivka průtoků pro povodí Černíči

Obrázek 4.19: Lineární a nelineární aproximace meziročního chodu koncentrací dusičnanů (spojité čáry) vyhodnocená z průměrných měsíčních koncentrací dusičnanů (body), závěrový profil v Černíči (1991-2000).

Obrázek 4.20: Sezónní chod koncentrací dusičnanů v povrchových vodách v Černíči: měřené hodnoty jsou vyznačeny body, křivka sinusovou aproximací hodnot (1992-2004)

Obrázek 4.21: Nelineární závislost mezi průtokem a koncentrací dusičnanů v povrchových vodách v Černíči (1992-2004)

Obrázek 4.22: Chod koncentrací dusičnanů a průtoků v drenážních vodách (šachtice Š1 a Š2) v Černíči (7/2004 – 6/2006)

Obrázek 4.23: Jednoduchý vzorkovač instalovaný nad závěrovým profilem v Černíči.

Obrázek 4.24: Snímky pořízené při monitoringu současného stavu odvodňovacího potrubí

Obrázek 4.25 : Vliv denitrifikačního filtru na koncentraci celkového dusíku v drenážní vodě

Obrázek 5.1: Rozložení tlakových útvarů na přelomu června a července 2009

Obrázek 5.2: Postup srážkového pásma nad ČR 2. 8. 2009 na radarových snímcích v šestihodinovém kroku

Obrázek 5.3: Množství srážek a výška hladiny na přelivu 2. 8. 2009–3. 8. 2009

Obrázek 7.1: Eroze a depozice půdy v Černíči podle modelu USPED v letech 1994, 2001, 2007, 2009

Obrázek 7.2: Dialogové okno Results programu WaTEM/ SEDEM

Obrázek 7.3: Dílčí výsledky modelu WaTEM/ SEDEM vypočtené pouze na základě vrstev DEM a pozemků před 2003. LS (ls.rst) vlevo a množství půdních částic vystupujících z elementů povodí (outflown.rst) vpravo.

Obrázek 7.4: Eroze a depozice půdy v Černíči podle modelu WaTEM/ SEDEM v letech 1994, 2001, 2007, 2009

Obrázek 7.5: Eroze půdy v Černíči podle rovnice USLE v letech 1994, 2001, 2007, 2009

Obrázek 7.6: Erozní rýhy ve vyjetých stopách od zemědělské techniky

Obrázek 7.7: Akumulace vody nad silnicí

Obrázek 7.8: Erozní rýha v místě 4

Obrázek 7.9: Koryto zanesené naplaveninami po události ze dne 2. 8. 2009 (vlevo), stav po vyčištění (vpravo)

Obrázek 7.10: Erozní rýha (lokalita č. 2)

Obrázek 7.11: Akumulační tvar (lokalita č. 1)

Obrázek 7.12: Projevy eroze v Černíči

Obrázek 7.13: Výskyt erozně-akumulačních forem v Černíči v roce 2009

Seznam zkratek

B	Brázda nízkého tlaku nad střední Evropou
Bp	Brázda postupující přes střední Evropu
BPEJ	Bonitované půdně ekologické jednotky
C	Cyklona nad střední Evropou
ČGS (ČGÚ)	Česká geologická služba (Český geologický ústav)
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČSN	Česká technická norma
ČÚZK	Český úřad zeměměřičský a katastrální
ČVUT	České vysoké učení technické
DEM	Digital Elevation Model (digitální model terénu)
EEA	European Environmental Agency
Ec	Východní cyklonální situace
ER	Poměr obohacení
GIS	Geografický informační systém
HPJ	Hlavní půdní jednotka
MUSLE	Modifikovaná univerzální rovnice ztráty půdy
Nc	Severní cyklonální situace
NEc	Severovýchodní cyklonální situace
NL	Nerozpuštěné látky
RUSLE	Revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy
SDR	Poměr odnosu sedimentu
SWc1 (SWc2, SWc3)	Jihozápadní cyklonální situace 1. typu (2., 3. typu)
TTP	Trvalý travní porost
USLE	Univerzální rovnice ztráty půdy
USPED	Unit Stream Power Based Erosion/ Deposition model
Vfz	Vchod frontální zóny
VÚMOP	Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v v. i.
Wal	Severní anticyklonální situace letního typu
WaTEM/ SEDEM	Water and Tillage Erosion Model/ Sediment Delivery Model
Wc	Západní cyklonální situace
Wcs	Západní cyklonální situace s jižní drahou

Seznam použité literatury a zdrojů

- 1) Atlas ČSSR (1984). Geodetický a kartografický podnik v Praze. Praha. 50s.
- 2) Atlas podnebí Česka. ČHMÚ a UP v Olomouci. Praha a Olomouc, 2007.
- 3) BAKKER, M. M., GOVERS, G., KOSMAS, C., VENACKER, V., VAN OOST, K. ROUNSEVELL, M. (2005): Soil erosion as a driver of land-use change. Agriculture, Ecosystems and Environment 105 (2005) s. 467 - 481.
- 4) BALATKA, B.; KALVODA, J. (2006) : Geomorfologické členění reliéfu Čech. Kartografie Praha, Praha, 79 s.
- 5) BALLS, R. W., MACDONALD, A., PUGH, K. B., EDWARDS, A.C. (1997): Rainfall events and their influence on nutrient distributions in the Ethen Estuary (Scotland). Estuarine, Coastal and Shelf Science (1997) 44 (Suplement A), s. 73-81.
- 6) BEK, S. (2007): Digitální mapování koluvizemí. Magisterská práce. KFGG PřF UK. Praha. 96 s.
- 7) BOARDMAN, J. (2007): Soil erosion: the challenge of assessing variation through space and time. In: Goudie, A. S., Kalvoda, J. (eds.): Geomorphological Variations. Praha, Nakladatelství P3K, s. 205-220.
- 8) BROM, J. (2010): Inhibitory nitrifikace.
Dostupné na: www.jbrom.wz.cz/vyuk/inh_nitr.pdf, přístup 1. 3. 2010.
- 9) CULEK, M (1996) a kol.: Biogeografické členění České republiky. Enigma, Praha, 347 s.
- 10) ČEKAL, R. (2007): Analýza atmosférických příčin povodní na příkladu povodí horní Ohře. In: Langhammer, J.: Povodně a změny v krajině. PřF UK, Praha, s.111-122.
- 11) Česká technická norma. Jakost vody – klasifikace jakosti povrchových vod. ČSN 757221. Český normalizační institut, 1998.
- 12) ČHMÚ: Vyhodnocení povodní v červnu a v červenci 2009 na území ČR. Dostupné online <http://voda.chmi.cz/ps09/doc/02.pdf>, přístup 1.4.2010.
- 13) ČÍŽEK, V. (2001): Transport aniontů půdním profilem. In: Doležal F.: Pokusná zemědělsko-lesní povodí VÚMOP ve středočeském krystaliniku. Sborník z workshopu VÚMOP, Nové Hradky. VÚMOP, Praha, s. 83-96.
- 14) DAMAŠKOVÁ, H. (1996): Modelování pohybu dusíku v půdě ve vztahu ke kontaminaci hydrosféry. Závěrečná zpráva řešení grantového projektu č.502/93/0236. VÚMOP, Praha.
- 15) DOLEŽAL, F., KULHAVÝ, Z., ČMELÍK, M., KVÍTEK, T., SOUKUP, M., TIPPL, M. (2001): Hydrologická bilance pokusných povodí. In: Doležal F.: Pokusná zemědělsko-lesní povodí VÚMOP ve středočeském krystaliniku. Sborník z workshopu VÚMOP, Nové Hradky. VÚMOP, Praha, s. 13-22.
- 16) DOSTÁL A KOL. (2006a): Dlouhodobé průměrné hodnoty R faktoru (1962-2001). In: Metody a způsoby predikce povrchového odtoku, erozních a

- transportních procesů v krajině. Výzkumná zpráva projektu COST 634. FSV KHKI, ČVUT v Praze. Dostupné online: http://storm.fsv.cvut.cz/on_line/pjv3/mapa_R_faktor_dlouhodoby.jpg, přístup 1. 3. 2010.
- 17) DOSTÁL A KOL. (2006b): Hodnoty R faktoru včetně povodňových let. In: Metody a způsoby predikce povrchového odtoku, erozních a transportních procesů v krajině. Výzkumná zpráva projektu COST 634. FSV KHKI, ČVUT v Praze. Dostupné online: http://storm.fsv.cvut.cz/on_line/pjv3/mapa_R_faktor_2000_2005, přístup 1. 3. 2010.
- 18) DOSTÁL, T. (2007): Soubor prezentací k předmětu Protierozní ochrana. FSV ČVUT. Dostupné na: http://storm.fsv.cvut.cz/on_line/peo, přístup 20. 6. 2007.
- 19) DREWRY, J. J., NEWHAM, L. T. H., CROKE, B. F. W. (2009): Suspended sediment, nitrogen and phosphorus concentrations and exports during storm events to the Tuross estuary, Australia. *Journal of Environmental Management* 90 (2009), s. 879-887.
- 20) EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (2007): Europe's environment - The fourth assessment. Office for Official Publications of the European Communities. Copenhagen, 452 s.
- 21) FENG, X., WANG, Y., CHEN, L., FU, B., BAI, G. (2010): Modelling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology* (2010).
- 22) FUČÍK (2007): Diagnostika, monitoring a revitalizace odvodňovacích systémů na zemědělských půdách z hlediska ochrany jakosti vod. Závěrečná zpráva 2006 projektu QF3301. Ministerstvo zemědělství a Národní agentura pro zemědělský výzkum, Praha.
- 23) GABRIELOVÁ, Z. (1998): Plaveniny říčky Blšanky. Diplomová práce. PřF UK. Praha, 102 s.
- 24) CHLUPÁČ, I., ŠTORCH, P. (1992): Regionálně geologické členění Českého masivu na území ČR. In: *Časopis pro mineralogii a geologii*. ČGÚ. Praha.
- 25) JACINTHE, P. A., LAL, R., OWENS, L. B., HOTHEM, D. L. (2004): Transport of labile carbon in runoff as affected by land-use and rainfall characteristics. *Soil & Tillage Research* 77 (2004), s. 111-123.
- 26) JAKUBÍKOVÁ, A. (2009): Soubor prezentací k předmětu Simulační modely k ochraně a organizaci povodí, FSV ČVUT. Dostupné na: http://storm.fsv.cvut.cz/on_line/soop/, přístup 27. 9. 2009.
- 27) JANEČEK, M., KUBÁTOVÁ, E., TIPPL, M. (2006): Nové určení faktoru erozní účinnosti dešťů – R pro území České republiky. In: *Sborník příspěvků z odborného semináře Erozní procesy a pozemkové úpravy*. KHKI ČVUT v Praze a Česká společnost krajinných inženýrů. Praha, 7 s.
- 28) JANEČEK, M. (2004): Sledování vlivu zemědělského hospodaření na kvalitu vody a množství erozních smyvů. Výroční zpráva za rok 2003. Komplexní řešení problémů hospodaření s půdou, vodou a krajinou. In: *Diagnostika erozních procesů a jejich účinků na půdu*. Etapa výzkumného záměru MZE-M07-99-01-08. VÚMOP, Praha, s. 55-68.

- 29) JANEČEK, M. (2007): Ochrana zemědělské půdy před erozí. Metodika. VÚMOP, Praha, 76 s.
- 30) JANEČEK, M. a kol. (1992): Ochrana zemědělské půdy před erozí. Metody pro zavádění výsledků výzkumu do zemědělské praxe, 5. ÚVTIZ, Praha, 110 s.
- 31) JANEČEK, M. a kol. (2002): Ochrana zemědělské půdy před erozí. ISV nakladatelství, Praha, 201s.
- 32) JANEČEK, M., KUBÁTOVÁ, E., TIPPL, M. (1996): Nové určení faktoru erozní účinnosti dešťů – R pro území ČR. In: Sborník příspěvků z odborného semináře Erozní procesy a pozemkové úpravy. KHMKI ČVUT v Praze a Česká společnost krajinných inženýrů. Praha, 7 s.
- 33) JIN, K. a kol. (2009): Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses. *Catena* 78 (2009), s. 81 -86.
- 34) JOHANOVSKÝ, Z. (2004): Černíči. Metadata výzkumného povodí. VÚMOP, Praha, 43 s.
- 35) JORDAN, G., VAN ROMPAEY, A., SZILASSI, P., CSILLAG, G., MANNAERTS, CH., WOLDAI, T. (2005): Historical land-use changes and their impact on sediment fluxes in the Balaton Basin (Hungary). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 108 (2005) s. 119 - 133.
- 36) KADLEC, J. (2007): Modelování erozních procesů v povodí Blanky. Diplomová práce, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie PŘF UK, Praha, 93 s.
- 37) KEESTRA, S. D., VAN DAM, O., VERSTRAETEN, G., VAN HUISSTEDEN, J. (2009): Changing sediment dynamics due to natural reforestation in the Dragona catchment SW Slovenia. *Catena* 78 (2009) s. 60-71.
- 38) KIM, J. S., OH, S. Y., OH, K. Y. (2006): Nutrient runoff from a Korean rice paddy watershed during multiple storm events in the growing season. *Journal of Hydrology* (2006) 327, s. 128-139.
- 39) KLIMENT, Z., KADLEC, J., LANGHAMMER, J. (2008): Evaluation of suspended load changes using AnnAGNPS and SWAT semi-empirical erosion models. *Catena* 73 (2008) s. 286-299.
- 40) KLIMENT, Z., LANGHAMMER, J. (2005): Modelování erozního ohrožení ve velkých územních celcích. In: Geomorfologický sborník 4, PFJU, České Budějovice, s. 75 - 81.
- 41) KOVÁŘ, P., JANEČEK, M., TIPPL, M., VETIŠKOVÁ, D. (2004): Analýza příčin a projevů povodní na malých povodích v České republice. *Soil and Water*, 3/2004: 109-124. Scientific Studies RISWC Praha.
- 42) KRÁSA, J. (2004): Hodnocení erozních procesů ve velkých povodích za podpory GIS. Disertační práce. KHKI FSV ČVUT, Praha, 186 s.
- 43) KRÁSA, J., DOSTÁL, T., VAN ROMPAY, A., VÁŠKA, J., VRÁNA, K. (2005): Reservoirs siltation measurements and sediment transport assesement in the Czech Republic, the Vrchlice catchment study. *Catena* 64 (2005) s. 348 – 362.
- 44) KULHAVÝ A KOL. (2001): Extrémní průtoky v pokusných povodích a pravděpodobnost jejich výskytu. In: Doležal F.: Pokusná zemědělsko-lesní

- povodí VÚMOP ve středočeském krystaliniku. Sborník z workshopu VÚMOP, Nové Hradky. VÚMOP, Praha, s. 37-49.
- 45) KULHAVÝ, Z. (2005): Racionalizace využívání, údržby a oprav odvodňovacích staveb. Periodická zpráva 2004 projektu QF3095. Ministerstvo zemědělství a Národní agentura pro zemědělský výzkum, Praha, 28 s.
- 46) KULHAVÝ, Z. (2006): Redakčně upravená zpráva o postupu a výsledcích řešení etapy MZE00027049103 za roky 2004 a 2005. VÚMOP, Praha.
- 47) KUŠOVANÁ, E. (2001): Fosfor v půdě. Dostupné na: www.agroweb.cz, přístup 1. 3. 2010.
- 48) KVÍTEK T. (1999): Vývoj koncentrací dusičnanů a analýza stability zemědělských povodí vodárenské nádrže Švihov. In: Rostlinná výroba.roč 45, č. 3. s. 107-111.
- 49) KVÍTEK, T., SOUKUP, M., KULHAVÝ, Z., TIPPL, M. (2001): Trendy vývoje koncentrací dusičnanů v povrchových a drenážních vodách experimentálních povodí VÚMOP Praha. In: Doležal F.: Pokusná zemědělsko-lesní povodí VÚMOP ve středočeském krystaliniku. Sborník z workshopu VÚMOP, Nové Hradky. VÚMOP, Praha, s. 61-81.
- 50) LANGHAMMER, J. (2002): Kvalita povrchových vod a jejich ochrana. PřF UK, 225 s. Dostupné na <http://web.natur.cuni.cz/~langhamr/>, přístup 1. 3. 2010.
- 51) LANGHAMMER, J., KLIMENT, Z. (2006): Změny kvality vody v zemědělských oblastech Česka. In: Geografie – Sborník ČGS 2006 (2)/ 111, s. 168 - 185.
- 52) MITÁŠ, L., MITÁŠOVÁ, H. (1998): Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. Water Resources Research 34 (3), s. 505 – 516.
- 53) MITÁŠOVÁ, H., HOFIERKA, J., ZLOCHA, M., IVERSON, L. R. (1996): Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. International Journal of GIS 10 (5), s. 629 – 641.
- 54) MOOR, J. J. W., VERSTRAETEN, G. (2008): Alluvial and colluvial sediment storage in the Geul River catchment (The Netherlands) – Combining field and modelling data to construct a Late Holocene sediment budget. Geomorphology 95 (2008) s. 487 – 503.
- 55) PEETERS, I., ROMMENS, T., VERSTRAETEN, G., GOVERS, G., VAN ROMPAY, A., POESEN, J., VAN OOST, K. (2006): Reconstructing ancient topography through erosion modelling. Geomorphology 78 (2006), s. 250 – 264.
- 56) PELACANI, S., MÄRKER, M., RODOLFI, G. (2008): Simulation of soil erosion and deposition in a changing land-use: A modelling approach to implement the support practice factor. Geomorphology 99 (2008), s. 329 – 340.
- 57) PISTOCCHI, A., CASSANI, G., ZANI, O. (2002): Use of the USPED model for mapping and managing best land conservation practices. Dostupné na: http://www.iemss.org/iemss2002/proceedings/pdf/volume%20tre/331_pistocchi.pdf, přístup 14. 2. 2010.
- 58) RAMOS, M. C., Martínez-Casanovas J.A. (2004): Nutrient losses from a vineyard soil in Northeastern Spain caused by an extraordinary rainfall event. Catena 55 (2004), s. 79-90.

- 59) RIMAL, B. K., LAL, R. (2009): Soil and carbon losses from five different land management areas under simulated rainfall. *Soil & Tillage Research* 106 (2009), s. 62-70.
- 60) ROYSSCHAERT, G., POESEN, J., NOTEBAERT, B., VERSTRAETEN, G., GOVERS, G. (2008): Spatial and long-term variability of soil loss due to crop harvesting and the importance relative to water erosion: A case study from Belgium. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 126 (2008) s. 217-228.
- 61) SCHRAMM, M. (1994): Ein Erosionsmodell mit räumlich und zeitlich veränderlicher Rillmorphologie. In: *Mitteilungen. Heft 190/1994. Universität Friederichsruhe zu Karlsruhe*, 1994.
- 62) SLÁMOVÁ, P. (2007): Exkurze na simulátory deště. Dostupné na www.vimevite.cz, přístup 6. 2. 2010.
- 63) SOBÍČEK, B. A KOL. (1993): Meteorologický slovník výkladový terminologický. Academia a MŽP ČR. Praha.
- 64) SOUKUP, M. (2001): Rozsah a funkce odvodňovacích systémů v experimentálních povodích VÚMOP Praha. In: Doležal F.: *Pokusná zemědělsko-lesní povodí VÚMOP ve středočeském krystaliniku. Sborník z workshopu VÚMOP, Nové Hradky. VÚMOP, Praha*, s. 23-35.
- 65) STANKOVIANSKY, M., KOCO, Š., PECHO, J., JENČO, M., JUHÁŠ, J. (v tisku, 2009): Geomorphic response of dry valley basin to large scale land-use changes in the second half of 20th century and problems with its reconstructions.
- 66) STRAKOVÁ, E. (1999): Srážkové poměry v povodí Blšanky (diplomová práce) PřF UK. Praha, 126 s.
- 67) ŠARAPATKA, B., DLAPA, P., BEDRNA, Z. (2002): Kvalita a degradace půdy. Univerzita Palackého, Olomouc, 246 s.
- 68) TIPPL, M. (1998): Zhodnocení erozního ohrožení a látkový odnos v povodněmi postižených území. Zpráva za etapu 5.2.3. DÚ 5.2.: Vliv stavu a využívání krajiny na povodňovou situaci. VÚMOP, 75s.
- 69) TIPPL, M. (2001): Eroze a odnos splavenin v pokusných povodích. In: Doležal F.: *Pokusná zemědělsko-lesní povodí VÚMOP ve středočeském krystaliniku. Sborník z workshopu VÚMOP, Nové Hradky. VÚMOP, Praha*, s. 49-59.
- 70) TIPPL, M., JANEČEK, M., BOHUSLÁVEK, J. (2008): Vliv vybraných technologií pěstování kukuřice na erozi půdy a povrchový odtok. *Agritech Science* 2008 (1), s. 1-10. Dostupné na www.agritech.cz, přístup 27.2.2010.
- 71) VAN OOST, K., GOVERS, G., CERDAN, O., THAURÉ, D., VAN ROMPAEY, A., STEEGEN, A., NACHTERGAELE, J., TAKKEN, I., POESEN, J. (2005): Spatially distributed data for erosion model calibration and validation: The Ganspoel and Kinderveld datasets. *Catena* 61 (2005), s. 105 – 121.
- 72) VAN OOST, K., GOVERS, G., DESMET, P. J. J. (2000): Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology* 15 (6), 579-591.

- 73) VAN ROMPAEY, A., KRÁSA, J., DOSTÁL, T. (2007): Modelling the impact of land cover changes in the Czech Republic on sediment delivery. *Land Use Policy* 24 (2007), s. 576 -583.
- 74) VAN ROMPAEY, A., BAZZOFFI, P., JONES, R.J.A., MONTARELLA, L. (2005): Modelling sediment yields in Italian catchements. *Geomorphology* 65 (2005) s. 157-169.
- 75) VAN ROMPAY, A., VERSTRAETEN, G., VAN OOST, K., GOVERS, G., POESEN, J. (2001): Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms* 26 (11), s. 1221-1236.
- 76) VENTE, DE J., POESEN, J., VERSTRAETEN, G., VAN ROMPAY, A., GOVERS, G. (2008): Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. *Global and Planetary Change* 60 (2008), s 393 – 415.
- 77) VERACHTERT, E. (2010), VAN DEN EECKHAUT, M., POESEN, J., DECKERS, J. (2010): Factors controlling the spatial distribution of soil piping erosion on loess-derived soils: A case study from Central-Belgium. *Geomorphology* (2010).
- 78) VERSEVELD, W. J., McDONNELL J.J., LAJTHA, K. (2009): The role of hillslope hydrology in controlling nutrient loss. *Journal of Hydrology* 367 (2009), s. 177-187.
- 79) VERSTRAETEN, G. (2006): Regional scale modelling of hillslope sediment delivery with SRTM elevation data. *Geomorphology* 81 (2006), s. 128 – 140.
- 80) VERSTRAETEN, G., PROSSER, I. P., FOGARTY, P. (2007): Predicting the spatial patterns of hillslope sediment delivery to river channels in the Murrumbidgee catchment, Australia. *Journal of Hydrology* (2007) 334, s. 440 – 454.
- 81) VERSTRAETEN, G., VAN OOST, K., VAN ROMPAEY, A., POESEN, J., GOVERS, G. (2002): Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling. *Soil Use and Management*, 18, s. 386-394.
- 82) VOPRAVIL, J. (2006): Nové určení erodovatelnosti půdy K pro jednotlivé HPJ a půdy České republiky. In: *Sborník příspěvků z odborného semináře Erozní procesy a pozemkové úpravy*. KHMKI ČVUT v Praze a Česká společnost krajinných inženýrů. Praha, 11 s.
- 83) VÚMOP (2009): Nепublikované materiály.
- 84) WARD, P. J., VAN BALEN, R. T., VERSTRAETEN, G., RENSSSEN, H., VANDENBERGHE, J. (2009): The impact of land use and climate change on late Holocene and future suspended sediment yield of the Meuse catchment. *Geomorphology* 103 (2009), s. 389 - 400.
- 85) WARREN, S. D., MITÁŠOVÁ, H., HOHMANN, M.G., LANDSBERGER, S., ISKANDER, F.Y., RUZYCKI, T.S., SENSEMAN, G.M. (2005): Validation of 3-D enhancement of the Universal Soil Loss Equation for prediction of soil erosion and deposition. *Catena* 64 (2005), s. 281 – 296.
- 86) YANG, J.L., ZHANG, G.L., SHI X.Z, WANG H.J., CAO, Z.H. RITSEMA, C.S. (2009): Dynamic changes of nitrogen and phosphorus losses in ephemeral

runoff processes by typosal storm events in Sichuan Basin, SW China. Soil& Tillage Research 105 (2009) s. 292-299.

- 87) ZHANG, Z. et al. (2008): Characterisation of diffuse polutions from forested watersheds dutiny storm events – Its association with rainfall and watershed features. Scienceof the Total Environment 390 (2008) s. 215-226.

Internet

- 1) Experimentální povodí. Dostupné na www.hydromeliorace.cz, přístup 12. 12. 2009.
- 2) Fiedler-Mágr Elektronika pro ekologii. Datahosting. www.fiedler-magr.cz, přístup 1. 12. 2009.
- 3) Geography the K. U. Leuven. Dostupné na: <http://geo.kuleuven.be/geography/modelling/erosion/watemsedem/index.htm>, přístup 1. 1. 2010.
- 4) USPED model for erosion/ deposition. Dostupné na: <http://skagit.meas.ncsu.edu/~helena/gmslab/denix/usped.html>, přístup 14. 2. 2010.
- 5) LS –converter. Dostupné na: www.plaveniny.cz/cz/rusle/ls-converter, přístup 1. 3. 2010.

Datové zdroje

- 1) Databáze denních srážkových úhrnů a průměrných průtoků pro stanici Černíči (2000-2009), zpracoval VÚMOP, Praha.
- 2) Digitální prostorová data Černíči (vrstevnice, DEM, hony, odvodnění). VÚMOP, Praha.
- 3) Jakost vody na profilu Černíči. VÚMOP, Praha 2010.
- 4) Katalog cirkulačních typů ČR. ČHMÚ. Dostupné online www.chmi.cz, přístup 15. 3. 2009.
- 5) KLETEČKA, F. (2009): Databáze pěstovaných plodin ZD Čechtice 1991-2009.
- 6) Plošné odhady srážek z radaru (archiv 2004-2009). Nepublikováno. ČHMÚ 2009.
- 7) PRAŽÁK, P. (2010): Databáze pěstovaných plodin v Černíči 1990-2009.

Mapové zdroje

- 1) ArcData ČR. 2009.
- 2) Císařské otisky stabilního katastru z roku 1850. 1:2000. Listy Czernitchy a Krziwsaudow (poskytnuto prostřednictvím ČÚZK).
- 3) Digitální mapa BPEJ 1:5000, výřez pro povodí Černíči, zpracoval VÚMOP, Praha 2009.
- 4) Digitální mapa honů a využití území, zpracoval VÚMOP. Praha, 2009.

- 5) Digitální model území 5, výřez pro povodí Černíči, na základě geodetických měření zpracoval VÚMOP, Praha.
- 6) Digitální ortofoto ČR. Geodis Brno, 2002-2003 a 2003-2008. Dostupné na www.mapy.cz, přístup 1. 2. 2010.
- 7) Geologická mapa ČR 1:50 000. Dostupná na <http://mapy.geology.cz>, přístup 1. 2. 2010.
- 8) Kartogram zrnitosti, skeletovitosti a zamokření. Okres Benešov. 1:10000. Expediční skupina pro průzkum půd Praha. Praha, 1972.
- 9) Mapa Generálního štábu čs. armády, list č. M-33-91-A-a 1:25 000, 1955.
- 10) Mapa Generálního štábu čs. armády, list č. M-33-91-A-a 1:25 000, 1985.
- 11) Ortofoto České republiky 1:5 000. Listy PACO00, PACO01, PACO10, PACO11. ČÚZK (2006-2008).
- 12) Půdní mapa ČR 1:50 000, list 23-12 Ledeč nad Sázavou. Český geologický ústav. Praha 1996.
- 13) Topografická mapa ČSR. Měřítko 1:25000. Listy 4154-3, 4154-4. 1920.

Použitý software

- 1) ArcGIS 9.3.
- 2) LS converter
- 3) MS Office 2007
- 4) WaTEM/ SEDEM 2.1.0.